

**Ю. А. АНУФРИЕВ
В. Н. ГУСЕВ
В. Ф. СМЕРНОВ**



ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ



« ЭНЕРГИЯ »

В ы п у с к 55

**Ю. А. АНУФРИЕВ,
В. Н. ГУСЕВ,
В. Ф. СМИРНОВ**

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ



«Э Н Е Р Г И Я»

МОСКВА 1976

6Ф2.13

А 73

УДК 621.319.4

*ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ АНУФРИЕВ
ВЕНИАМИН НИКОЛАЕВИЧ ГУСЕВ
ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ СМИРНОВ*

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Редактор *В. Н. Бородулин*

Редактор издательства *А. А. Цитленко*

Технический редактор *Г. Г. Самсонова*

Корректор *З. Б. Драновская*

○

Сдано в набор 26/III 1976 г. Подписано к печати 1/VII 1976 г. Т-11061
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 1 Усл. печ. л. 11,76
Уч.-изд. л. 12,67 Тираж 13 000 экз. Зак. 605 Цена 67 коп.

○

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

○

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Ануфриев Ю. А. и др.

**А 73 Эксплуатационные характеристики и надежность
электрических конденсаторов. М., «Энергия», 1976.**

224 с. с ил. (Б-ка по радиоэлектронике. Вып. 55).

Перед загл. авт.: **Ю. А. Ануфриев, В. Н. Гусев, В. Ф. Смирнов.**

В книге излагаются основные сведения об электрических характеристиках и конструкции конденсаторов с указанием конкретных данных для конденсаторов различных типов. Даются рекомендации по выбору конденсаторов для работы в режимах постоянного, синусоидального и импульсного напряжений. Рассматривается влияние на конденсаторы различных климатических факторов, ионизирующих излучений и внешних механических нагрузок. Приводятся сведения о надежности конденсаторов и методах ее оценки.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся конструированием, изготовлением и эксплуатацией конденсаторов.

30404-454
А 051(01)-76 155-76

6Ф2.13

© Издательство «Энергия», 1976.

Электрические конденсаторы являются одним из наиболее массовых видов радиодеталей и широко используются в технике. Правильное применение конденсаторов во многом определяет надежную работу радиоэлектронной аппаратуры. Описанию конструкций конденсаторов, сведениям об основах теории конденсаторостроения посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ, среди которых наиболее фундаментальна монография В. Т. Ренне «Электрические конденсаторы».

Авторы поставили перед собой задачу дополнить имеющуюся литературу по конденсаторам книгой, в которой в краткой и доступной форме были бы изложены основные сведения о характеристиках конденсаторов, особенности их применения в различных режимах, даны рекомендации по расчету рабочих режимов, освещены вопросы надежности и методы ее контроля.

Книга состоит из пяти глав. В гл. 1 приводятся основные сведения о свойствах и параметрах конденсаторов.

В гл. 2 рассматриваются основные типы конденсаторов постоянной емкости, выпускаемых отечественной промышленностью.

Глава 3 посвящена выбору конденсаторов для работы в различных электрических режимах.

В гл. 4 рассматриваются вопросы эксплуатации конденсаторов при различных климатических условиях, механических воздействиях, а также при ионизирующих излучениях.

Глава 5 содержит основные понятия и положения теории надежности, которые могут быть применены для оценки надежности конденсаторов. Приведен анализ работ по созданию методов ускоренной оценки надежности и изложен принцип построения конкретной ускоренной методики для некоторых типов керамических конденсаторов.

Авторы

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ
И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ****1-1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ
КОНДЕНСАТОРОВ**

Электрические характеристики, конструкция и область применения конденсаторов в определяющей степени зависят от диэлектрика между его обкладками. По виду диэлектрика конденсаторы постоянной емкости можно подразделить на пять групп.

1. Конденсаторы с газообразным диэлектриком: воздушные, газонаполненные, вакуумные.

2. Конденсаторы с жидким диэлектриком.

3. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком: керамические, стеклокерамические, стеклоэмалевые, стеклопленочные, тонкослойные из неорганических пленок, слюдяные.

4. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком: бумажные, пленочные, с комбинированным диэлектриком (бумага + пленка, пленка + пленка), тонкопленочные, лакопленочные.

5. Конденсаторы с оксидным диэлектриком (алюминиевые, танталовые, титановые, ниобиевые, сплавные — тантал + ниобий и др.): электролитические, оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические.

По конструкции обкладок третья и четвертая группы конденсаторов подразделяются на конденсаторы с фольговыми обкладками и конденсаторы с металлизированными обкладками.

В пятой группе у электролитических конденсаторов роль второй катодной обкладки выполняет электролит, а у оксидно-полупроводниковых конденсаторов — электронный полупроводник. В последнее время разработана новая серия конденсаторов этого типа — оксидно-металлические — с обкладками, выполненными из металла.

Краткие характеристики и сокращенные обозначения конденсаторов

Тип конденсатора по виду диэлектрика	Сокращенное обозначение	Основные особенности	Основные области применения
Керамические на номинальные напряжения ниже 1600 В	K10	Для высокочастотных конденсаторов: малые потери, большой выбор значений ТКЕ Для низкочастотных: большая удельная емкость, резкая зависимость емкости от температуры	Для высокочастотных конденсаторов: термокомпенсация, емкостная связь, фиксированная настройка контуров на высокой частоте Для низкочастотных конденсаторов: шунтирующие, блокирующие и фильтровые цепи, связь между каскадами на низкой частоте
Керамические на номинальные напряжения 1600 В и выше	K15	Относительно большие реактивные мощности, большой выбор значений ТКЕ	Емкостная связь, фиксированная настройка мощных высокочастотных контуров, импульсная техника
Стекланные Стеклокерамические Стеклоэмалевые	K21 K22 K23	Малые потери, высокое значение сопротивления изоляции, высокая стабильность емкости во времени	Блокировка, фиксированная настройка высокочастотных контуров, емкостная связь, шунтирующие цепи
Слюдяные малой мощности Слюдяные большой мощности	K31 K32	Малые потери, низкая удельная емкость, малое изменение емкости от температуры и во времени	Блокировочные и шунтирующие, высокочастотные фильтровые цепи, емкостная связь, фиксированная настройка контуров
Бумажные на номинальное напряжение ниже 1600 В с фольговыми обкладками	K40	Повышенные потери, высокая удельная емкость, значительная индуктивность	Блокировочные, буферные, шунтирующие, фильтровые цепи, емкостная связь

Продолжение табл. 1-1

Тип конденсатора по виду диэлектрика	Сокращенное обозначение	Основные особенности	Основные области применения
Бумажные на номинальное напряжение 1600 В и выше с фольговыми обкладками	K41	То же	То же
Бумажные с металлизированными обкладками (металлобумажные)	K42	Большая, чем у бумажных удельная емкость, способность самовосстанавливаться при пробое	Цепи развязок и фильтры; для емкостной связи не применяются
Электролитические алюминиевые	K50	Очень большая удельная емкость, большие потери, значительные токи утечки	Шунтирующие и фильтровые цепи, накопление энергии в импульсных устройствах
Электролитические танталовые фольговые	K51	По сравнению с электролитическими алюминиевыми: большая удельная емкость, меньшие потери и токи утечки, увеличенный срок хранения, более широкий интервал рабочих температур. Лучшие температурно-частотные характеристики	Применяются в тех же цепях что и электролитические алюминиевые, в основном, в транзисторной аппаратуре с повышенными требованиями к параметрам конденсаторов
Электролитические танталовые объемнопористые	K52		
Оксиднополупроводниковые	K53		
Воздушные Газообразные	K60 K61	Очень малые потери и малая удельная емкость, очень малое изменение емкости во времени	Образцовые эталоны емкости, высоковольтные блокировочные, развязывающие, контурные конденсаторы
Полиэтирольные с фольговыми обкладками Полиэтирольные с металлизированными обкладками	K70 K71	Очень высокое сопротивление изоляции, низкая абсорбция	Точные временные цепи, интегрирующие устройства, настроенные контура высокой добротности, образцовые емкости

Продолжение табл. 1-1

Тип конденсатора по виду диэлектрика	Сокращенное обозначение	Основные особенности	Основные области применения
Фторопластовые	K72	Высокая рабочая температура (до 200°С), очень высокое сопротивление изоляции, низкая абсорбция, очень малые потери и малое изменение емкости от температуры	В тех же цепях, что и полистирольные при повышенных температурах и жестких требованиях к электрическим параметрам
Полиэтилентерефталатные с металлизированными обкладками Полиэтилентерефталатные с фольговыми обкладками	K73 K74	Малая абсорбция электрические характеристики несколько лучше, чем у бумажных конденсаторов	В тех же цепях, что и бумажные конденсаторы при повышенных требованиях к электрическим параметрам
Комбинированные	K75	Повышенная электрическая прочность и высокая надежность	В тех же цепях, что и бумажные конденсаторы при повышенных требованиях к надежности
Лакопленочные	K76	Высокая удельная емкость (выше, чем у металлобумажных конденсаторов), малые габариты, ток утечки меньше, чем у электролитических конденсаторов	Частично могут заменять электролитические конденсаторы (особенно при повышенных значениях переменной составляющей). Применяются в тех же цепях, что и бумажные, металлобумажные и электролитические конденсаторы
Поликарбонатные	K77	Высокое сопротивление изоляции, малая абсорбция, пониженные по сравнению с K73 потери	В тех же цепях, что и конденсаторы K73, но при более высоких частотах

По величине номинального напряжения конденсаторы обычно подразделяют на конденсаторы низкого и высокого напряжения (более 1600 В). Однако эта граница условна, используется, как правило, для конденсаторов массового назначения и может смещаться в ту или другую сторону.

Например, для конденсаторов с оксидным диэлектриком под термином «низкое» понимают напряжение в несколько десятков вольт, а наибольшее номинальное напряжение в силу особенностей конденсаторов этого типа не превышает 600 В.

Конденсаторы также классифицируют по электрическим режимам работы.

В табл. 1-1 приведена классификация конденсаторов, предназначенных для использования в радиоэлектронной технике.

Примененная в книге система условных обозначений конденсаторов была разработана взамен ранее существовавшей, в которой начальные буквы слов характеризовали тип конденсаторов (например, МБМ — металлобумажный миниатюрный, КСО — конденсатор слюдяной опрессованный, КБП — конденсатор бумажный проходной и т. д.).

1-2. ЕМКОСТЬ КОНДЕНСАТОРА. КОНДЕНСАТОРНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Электрический конденсатор состоит из проводящих обкладок, разделенных диэлектриком. Емкость конденсатора определяется как отношение заряда Q к напряжению U , приложенному к обкладкам:

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (1-1)$$

Для простейшего конденсатора, состоящего из двух плоских пластин одинакового размера, разделенных диэлектриком толщиной d , м, емкость определяется выражением

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \text{ Ф}, \quad (1-2)$$

где

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{4\pi \cdot 9} = \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S — площадь пластины, м^2 .

Как следует из формулы, емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрика. Величина ϵ определяется способностью диэлектрика поляризоваться в электрическом поле, т. е. теми видами поляризации, которые характерны для данного диэлектрика. В качестве диэлектрика конденсаторов используются органические и неорганические вещества.

Органические диэлектрики по их способности к поляризации могут быть разделены на две группы: полярные и неполярные материалы.

Представителями полярных диэлектриков являются конденсаторная бумага, полиэтилентерефталатная пленка (лавсан).

Для этих диэлектриков характерны относительно высокие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 3 \div 6$) и повышенные потери энергии с максимумами при определенных частотах и температурах, выше которых происходит уменьшение ϵ . Так, например, для бумаги в области низких температур наблюдается релаксационный максимум потерь при температуре $-80 \div -90^\circ\text{C}$ и частоте 50 Гц. Потери при этих температурах примерно на порядок выше, чем при нормальной температуре. В области максимума потерь наблюдается снижение диэлектрической проницаемости ϵ при уменьшении температуры. При повышении частоты максимум потерь сдвигается в область повышенных температур, поэтому при положительных температурах потери возрастают с частотой и, когда достигаются частоты около нескольких мегагерц, приобретают значение большее примерно на порядок, чем при 50 Гц.

Представителями неполярных диэлектриков являются полистирольная, полиэтиленовая, политетрафторэтиленовая пленки.

Диэлектрическая проницаемость ϵ и потери неполярных материалов практически не зависят от частоты во всем диапазоне радиочастот. При комнатной температуре значения ϵ неполярных твердых диэлектриков лежат в пределах 1,9—2,5.

Неорганические твердые диэлектрики, к которым относятся керамика, слюда, сегнетокерамика и др., имеют

значения ϵ , изменяющиеся в зависимости от их физико-химической структуры строения материалов в широких пределах, в среднем от 5 до 150 для линейных диэлектриков, у которых ϵ не зависит от напряженности электрического поля, например у слюды и двуокиси титана. Нелинейные сегнетоэлектрические материалы, например керамика на основе титаната бария, имеют значения ϵ от нескольких сотен до нескольких тысяч. Относительно большие значения ϵ могут быть также у пленочных оксидных материалов.

Таблица 1-2

Полные и кодированные обозначения номинальной емкости

Полная система обозначений				Кодированная система обозначений			
Единица измерения	Обозначение единиц измерения	Пределы номинальных емкостей	Примеры полных обозначений	Примеры кодированных обозначений	Пределы номинальных емкостей	Обозначения единиц измерения	Единицы измерения
Пикофарада	пФ	До 10 000	1 пФ 1,5 пФ 1,52 пФ 15 пФ 15,2 пФ	1П0 1П5 1П52 15П 15П2	До 100 От 0,1 до 100	П Н	Пикофарады Нанофарады
			100 пФ 150 пФ 152 пФ 1000 пФ 1500 пФ 1520 пФ	Н10 Н15 Н152 1Н0 1Н5 1Н52			
Микрофарада	мкФ	0,01 и выше	0,01 мкФ 0,015 мкФ 0,0152 мкФ	10Н 15Н 15Н2	0,1 и выше	М	Микрофарады
			0,1 мкФ 0,15 мкФ 0,152 мкФ 1 мкФ 1,5 мкФ 1,52 мкФ 15 мкФ 15,2 мкФ 150 мкФ 152 мкФ	М10 М15 М152 1М0 1М5 1М52 15М 15М2 150М 152М			

Значение емкости, указанное на конденсаторах или в сопроводительной документации, носит название номинальной емкости. Истинное значение емкости конденсатора может отличаться от номинального не более чем на допускаемое отклонение, которое также маркируется на конденсаторе или оговаривается технической документацией. Следует отметить, что номинальное значение емкости и отклонения от него измеряются на фиксированной частоте, которая указывается в технической документации. При других частотах значение емкости конденсатора может существенно отличаться от номинального. Наряду с известными полными обозначениями номинальной емкости и допустимого отклонения для малогабаритных конденсаторов и малоформатных схем применяют сокращенные, кодированные обозначения в соответствии с ГОСТ 11076-69. Они состоят из последовательно расположенных цифр, указывающих номинальную величину емкости, буквы, обозначающей единицу измерения емкости и одновременно указывающей положение запятой десятичной дроби, и буквы, обозначающей допустимое отклонение емкости от номинальной.

Порядок обозначения номинальных емкостей приведен в табл. 1-2, допускаемых отклонений — в табл. 1-3.

Номинальные емкости конденсаторов, кроме электролитических и конденсаторов с бумажным и пленочным диэлектриком в прямоугольных корпусах от 0,1 мкФ и выше, в зависимости от допускаемого отклонения соответствуют значениям, приведенным в табл. 1-4, 1-5, для электролитических алюминиевых конденсаторов — ряду

Таблица 1-3

Полные и кодированные обозначения допускаемого отклонения емкости от номинальной

Допускаемое отклонение емкости, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20
Кодированное обозначение	Ж	У	Д	Р	Л	И	С	В
Допускаемое отклонение емкости, %	+30	+50 -10	+50 -20	+80 -20	+100	+100 -10	$\pm 0,4$ пФ	—
Кодированное обозначение	Ф	Э	Б	А	Я	Ю	Х	—

Таблица 1-4

Значения номинальных емкостей, пФ, мкФ (по ГОСТ 2519-67) с различными допускаемыми отклонениями

Обозначения рядов			Обозначения рядов		
Е24 с допускае- мыми от- клонениями $\pm 5\%$	Е12 с допускае- мыми от- клонениями $\pm 10\%$	Е6 с допускае- мыми отклоне- ниями $\pm 20\%$ и более	Е24 с допускае- мыми от- клонениями $\pm 5\%$	Е12 с допускае- мыми от- клонениями $\pm 10\%$	Е6 с допускае- мыми отклоне- ниями $\pm 20\%$ и более
1,0	1,0	1,0	3,3	3,3	3,3
1,1			3,6		
1,2	1,2		3,9	3,9	
1,3			4,3		
1,5	1,5	1,5	4,7	4,7	4,7
1,6			5,1		
1,8	1,8		5,6	5,6	
2,0			6,2		
2,2	2,2	2,2	6,8	6,8	6,8
2,4			7,5		
2,7	2,7		8,2	8,2	
3,0			9,1		

0,5 — 1 — 2 — 5 — 10 — 20 — 30 — 50 — 100 — 200 — 300 — 500 — 1000 — 2000 — 5000, а для указанных выше бумажных и пленочных конденсаторов — ряду 0,1 — 0,25 — 0,5 — 1 — 2 — 4 — 6 — 8 — 10 — 20 — 40 — 60 — 80 — 100 — 200 — 400 — 600 — 800 — 1000.

Значения номинальных емкостей конденсаторов должны соответствовать числам, приведенным в указанных рядах, или произведению этих чисел на 10^n , где n — целое положительное или отрицательное число.

Приведенные значения емкостей не распространяются на конденсаторы специальные, например с газообразным диэлектриком, или конденсаторы, предназначенные для повышения коэффициента мощности, и др. Указанные ряды предназначены для выбора номинальной емкости конденсаторов, если в ТУ на конденсаторы приведены только пределы номинальных емкостей и допускаемое отклонение.

Допускаемое отклонение емкости от номинальной не является характеристикой, определяющей качество конденсатора (как, например, стабильность параметров, надежность); при выборе конденсаторов с тем или иным допуском необходимо учитывать только зависимость выходных параметров устройства от возможного отклонения емкости.

Таблица 1-5

Номинальные емкости, пФ, мкФ (по ГОСТ 2519-67),
с допускаемыми отклонениями менее $\pm 5\%$

Обозначения рядов			Обозначения рядов		
E192	E96	E48	E192	E96	E48
1,00	1,00	1,00	1,69	1,69	1,69
1,01			1,72		
1,02	1,02		1,74	1,74	
1,04			1,76		
1,05	1,05	1,05	1,78	1,78	1,78
1,06			1,80		
1,07	1,07		1,82	1,82	
1,09			1,84		
1,10	1,10	1,10	1,87	1,87	1,87
1,11			1,89		
1,13	1,13		1,91	1,91	
1,14			1,93		
1,15	1,15	1,15	1,96	1,96	1,96
1,17			1,98		
1,18	1,18		2,00	2,00	
1,20			2,03		
1,21	1,21	1,21	2,05	2,05	2,05
1,23			2,08		
1,24	1,24		2,10	2,10	
1,26			2,13		
1,27	1,27	1,27	2,15	2,15	2,15
1,29			2,18		
1,30	1,30		2,21	2,21	
1,32			2,23		
1,33	1,33	1,33	2,26	2,26	2,26
1,35			2,29		
1,37	1,37		2,32	2,32	
1,38			2,34		
1,40	1,40	1,40	2,37	2,37	2,37
1,42			2,40		
1,43	1,43		2,43	2,43	
1,45			2,46		
1,47	1,47	1,47	2,49	2,49	2,49
1,49			2,52		
1,50	1,50		2,55	2,55	
1,52			2,58		
1,54	1,54	1,54	2,61	2,61	2,61
1,56			2,64		
1,58	1,58		2,67	2,67	
1,60			2,71		
1,62	1,62	1,62	2,74	2,74	2,74
1,64			2,77		
1,65	1,65		2,80	2,80	
1,67			2,84		

Обозначения рядов			Обозначения рядов		
E192	E96	E48	E192	E96	E48
2,87	2,87	2,87	5,05		
2,91			5,11	5,11	5,11
2,94	2,94		5,17		
2,98			5,23	5,23	
3,01	3,01	3,01	5,30		
3,05			5,36	5,36	5,36
3,09	3,09		5,42		
3,12			5,49	5,49	
3,16	3,16	3,16	5,56		
3,20			5,62	5,62	5,62
3,24	3,24		5,69		
3,28			5,76	5,76	
3,32	3,32	3,32	5,83		
3,36			5,90	5,90	5,90
3,40	3,40		5,97		
3,44			6,04	6,04	
3,48	3,48	3,48	6,12		
3,52			6,19	6,19	6,19
3,57	3,57		6,26		
3,61			6,34	6,34	
3,65	3,65	3,65	6,42		
3,70			6,49	6,49	6,49
3,74	3,74		6,57		
3,79			6,65	6,65	
3,83	3,83	3,83	6,73		
3,88			6,81	6,81	6,81
3,92	3,92		6,90		
3,97			6,98	6,98	
4,02	4,02	4,02	7,06		
4,07			7,15	7,15	7,15
4,12	4,12		7,23		
4,17			7,32	7,32	
4,22	4,22	4,22	7,41		
4,27			7,50	7,50	7,50
4,32	4,32		7,59		
4,37			7,68	7,68	
4,42	4,42	4,42	7,77		
4,48			7,87	7,87	7,87
4,53	4,53		7,96		
4,59			8,06	8,06	
4,64	4,64	4,64	8,16		
4,70			8,25	8,25	8,25
4,75	4,75		8,35		
4,81			8,45	8,45	
4,87	4,87	4,87	8,56		
4,93			8,66	8,66	8,66
4,99	4,99		76		

Обозначения рядов			Обозначения рядов		
E192	E96	E48	E192	E96	E48
8,87	8,87		9,42		
8,98			9,53	9,53	9,53
9,09	9,09	9,09	9,65		
9,20			9,76		
9,31	9,31		9,88		

На практике при проектировании радиоаппаратуры обычно выбирают радиоэлементы, к которым наиболее чувствительны выходные параметры аппаратуры, при этом определяют приращения выходных параметров в функции приращения параметров элементов и при помощи функционального или вероятностного анализа с учетом заданных граничных условий рассчитывают допустимые отклонения параметров от номинала.

При выборе допускаемого отклонения емкости конденсаторов следует учитывать, что необоснованное применение конденсаторов повышенной точности связано с дополнительными затратами из-за их более высокой стоимости.

1-3. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЕМКОСТИ. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЕМКОСТИ

Значение емкости конденсатора при различных температурах определяется температурной зависимостью ϵ диэлектрика, а также изменением линейных размеров металла обкладок и диэлектрика. Зависимость емкости от температуры у конденсаторов с полярными диэлектриками отличается от линейной, а в случае неоднородных диэлектриков, например пропитанной конденсаторной бумаги, принимает довольно сложный вид. Однако для конденсаторов некоторых типов — высокочастотных керамических, слюдяных, воздушных, полистирольных и др., она приближается к линейной. Для оценки изменения емкости таких конденсаторов от температуры служит температурный коэффициент емкости (ТКЕ), показывающий, на сколько изменяется емкость при увели-

чении температуры на 1°C :

$$\text{ТКЕ} = \frac{C_2 - C_1}{C_1 (T_2 - T_1)}, \quad ^{\circ}\text{C}^{-1}, \quad (1-3)$$

где C_1 — емкость при температуре T_1 (обычно $25 \pm 10^{\circ}\text{C}$); C_2 — емкость при температуре T_2 (обычно предельной верхней или нижней).

ТКЕ чаще всего выражают в миллионных долях изменения емкости, отнесенных к градусу Цельсия ($10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$). Температурный коэффициент емкости может быть положительным, отрицательным или близким к нулю.

Для обозначения группы температурной стабильности конденсатора используются условные обозначения в виде букв, обозначающих знак ТКЕ (М — минус, П — плюс, МП — близкое к нулю) и цифр, указывающих значение ТКЕ в миллионных долях, а также цветная кодировка. Раньше области значений ТКЕ обозначались отдельными буквами (например, П, С, Р и т. д.), эти обозначения для конденсаторов некоторых типов применяются и в настоящее время.

В табл. 1-6 приведены значения ТКЕ для конденсаторов некоторых типов и их условные обозначения. По допускаемым отклонениям ТКЕ керамические, стекло-керамические и стеклянные конденсаторы подразделяются на два класса: А и Б. В табл. 1-6 эти значения приведены для конденсаторов класса Б.

Зная ТКЕ, легко оценить по ожидаемому изменению емкости при изменении температуры, используя выражение (1-3).

Для незащищенных и неизолированных конденсаторов емкостью свыше 68 пФ и изолированных конденсаторов емкостью свыше 150 пФ допускаемое отклонение ТКЕ у класса А будет в 2—2,5 раза меньше, чем у класса Б.

При конструировании и изготовлении электронной аппаратуры часто применяются параллельные и последовательные соединения конденсаторов. Значение ТКЕ системы конденсаторов будет зависеть от соотношения между ТКЕ и емкостями отдельных конденсаторов. Если обозначить значение ТКЕ такой системы через α , а емкость системы через C , то при параллельном соединении m конденсаторов будет справедливо выражение

$$\alpha = \frac{C_1}{C} \alpha_1 + \frac{C_2}{C} \alpha_2 + \dots + \frac{C_m}{C} \alpha_m, \quad (1-4)$$

Таблица 1-6

Значения температурных коэффициентов емкости и их условные обозначения

Вид конденсатора	Тип конденсатора	Значение ТКЕ на $1^{\circ}\text{C}\cdot 10^6$ в интервале температур (класс Б)	Интервал температур для ТКЕ, $^{\circ}\text{C}$	Условное обозначение ТКЕ		
				буквами и цифрами	цветным кодом	
					цвет покрытия конденсатора	цвет кодировочного знака
Керамические, стекло-керамические, стек-лянные	—	$+(100 \pm 40)$ $+(60 \pm 40)$ $+(33 \pm 30)$ 0 ± 30 $-(33 \pm 30)$ $-(47 \pm 40)$ $-(75 \pm 40)$ $-(150 \pm 40)$ $-(220 \pm 40)$ $-(330 \pm 60)$ $-(470 \pm 90)$ $-(750 \pm 120)$ $-(700 \pm 120)$ $-(1500 \pm 250)$ $-(1300 \pm 250)$ $-(2200 \pm 500)$	От 20 до 70	П100 П60 П33 МПО М33 М47 М75 М150 М220 М330 М470 М750 М700 М1500 М1300 М2200	Синий Серый Голубой " " " " Красный " " " " " " " " Зеленый " " Зеленый " " " " Желтый	Без знака Красный Без знака Черный Коричневый Без знака Красный Оранжевый Желтый Зеленый Синий " " Без знака То же " " Желтый
Стеклокерамические	СКМ-Т СКМ, K22У-1	± 50 $-(350 \pm 100)$ 0 ± 30 $-(47 \pm 30)$ $-(330 \pm 100)$	От 20 до 200 От 30 до 70	Г Д МПО М47 М330		Серый Голубой Красный
Стекло-эмалевые	СКС-1 ДС	0 ± 30 $-(65 \pm 30)$ $+(70 \pm 35)$ $+(150 \pm 30)$ ± 50	От 20 до 100 От -60 до +100	О М Р П —		
Слюдяные	—	± 200 ± 100 ± 50	Во всем рабочем интервале	Б В Г		
Металло-пленочные	МППТ, МПО, МПОО	-200 -150	От 20 до 60 От 20 до 60 $^{\circ}\text{C}$			
Пленочные	ФЧ K72П-6 ПМ ФТ ФД K70-7	-500 -200 -200 $+50 \div -200$ $+300$ $150-200$	От -60 до 155 От -60 до 200 От 20 до 7 От 50 до 1200 (от -60 до 200) От 20 до 60 От -60 до 60			

а при последовательном соединении n конденсаторов — выражение

$$\alpha = \frac{C}{C_1} \alpha_1 + \frac{C}{C_2} \alpha_2 + \dots + \frac{C}{C_n} \alpha_n. \quad (1-5)$$

Если имеется набор конденсаторов с различными значениями ТКЕ, то можно, используя параллельное, последовательное или смешанное соединение, получить систему конденсаторов с заданными значениями ТКЕ, в том числе и с ТКЕ, близкими к нулю. Необходимые значения емкостей двух конденсаторов, параллельное соединение которых позволяет получить результирующее значение ТКЕ, близкое к нулю, определяются из выражений

$$C_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} C; \quad C_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} C. \quad (1-6)$$

Такой подбор емкостей часто используется при создании образцовых конденсаторов.

Для конденсаторов с явно выраженной нелинейной зависимостью емкости от температуры, например сегнетокерамических, а также для конденсаторов, точные сведения об изменении емкости которых не представляют практического интереса, например электролитических, обычно приводят относительное изменение емкости в интервале рабочих температур.

Так, например, для керамических конденсаторов группы Н70 (буква Н означает, что ТКЕ не нормируется) изменение емкости в интервале рабочих температур ($-60 \div +85^\circ\text{C}$) не должно превышать 70% относительно емкости, измеренной при $+20^\circ\text{C}$. Для бумажных конденсаторов КБГ допускается изменение емкости до $\pm 10\%$ относительно емкости, измеренной при температуре $+20^\circ\text{C}$, при изменении температуры от -40 до $+70^\circ\text{C}$. Изменение емкости оксиднополупроводниковых конденсаторов К53-1А при температуре $+125^\circ\text{C}$ не должно превышать $+15\%$, а при температуре -80°C не должно превышать -15% относительно емкости, измеренной при $+20^\circ\text{C}$.

В табл. 1-7 приведены возможные значения изменения емкости керамических конденсаторов с ненормированными значениями ТКЕ и их обозначения при помощи цветной кодировки.

Группы температурной стабильности керамических конденсаторов с ненормированными значениями ТКЕ и их обозначения

Изменение емкости в интервале рабочих температур, относительно емкости, измеренной при 20°C, %, не более	Условные обозначения		
	буквами и цифрами	цветным кодом	
		цвет покрытия конденсатора	цвет кодировочного знака
± 10	H10	Оранжевый	Черный
± 20	H20	То же	Красный
± 30	H30	" "	Зеленый
± 50	H50	" "	Синий
± 70	H70	" "	Без знака
± 90	H90	" "	Белый

На рис. 1-1—1-6 приведены зависимости емкости некоторых типов конденсаторов от температуры. Как видно из приведенных рисунков, изменения емкости в пре-

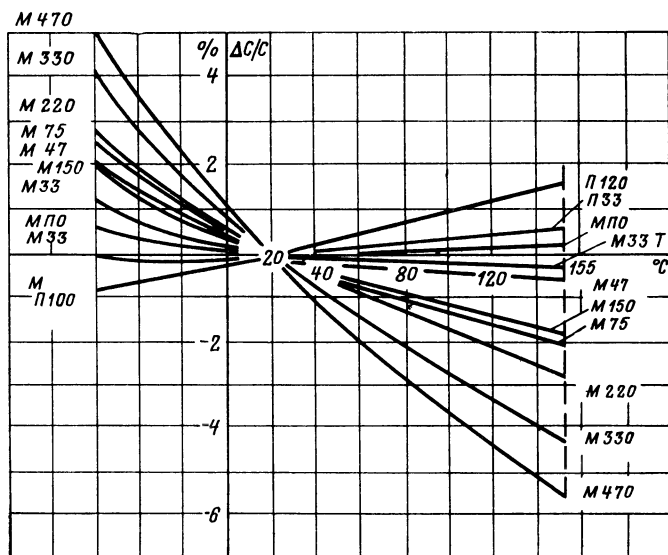


Рис. 1-1. Изменение емкости высокочастотных керамических конденсаторов в зависимости от температуры.

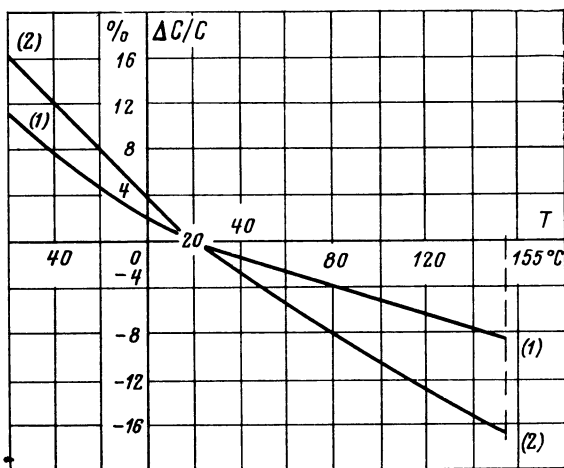


Рис. 1-2. Изменение емкости высокочастотных керамических конденсаторов групп М750 (1) и М1500 (2) в зависимости от температуры.

делах рабочих температур могут достигать больших значений (до -90%), которые необходимо учитывать при разработке аппаратуры.

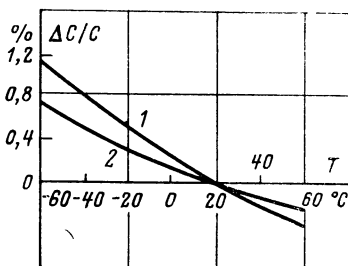


Рис. 1-3. Изменение емкости полистирольных конденсаторов в зависимости от температуры.
1 — фольговые; 2 — металлизированные.

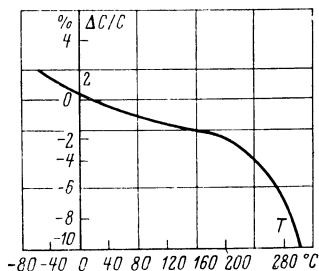


Рис. 1-4. Изменение емкости фторопластовых конденсаторов в зависимости от температуры на частоте 1000 Гц.

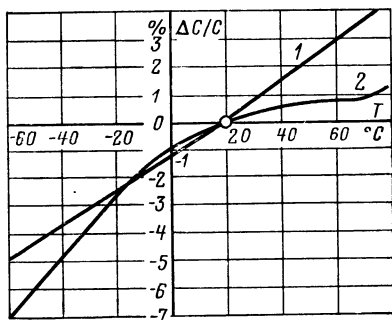


Рис. 1-5. Изменение емкости лакопленочных (1, $f=50$ Гц) и полиэтилентерефталатных металлизированных (2, $f=1000$ Гц) конденсаторов в зависимости от температуры.

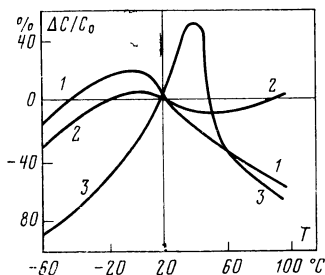


Рис. 1-6. Изменение емкости низкочастотных керамических конденсаторов в зависимости от температуры.

1 — N70; 2 — N30; 3 — N90 (C_0 — емкость, измеренная при 20 °C).

1-4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АБСОРБЦИЯ

Если замкнуть «накоротко» обкладки конденсатора на малое время, а затем разомкнуть их, то напряжение на его обкладках сначала упадет до нуля, а после размыкания может опять увеличиться до некоторого значения. Это явление наблюдается у конденсаторов с многослой-

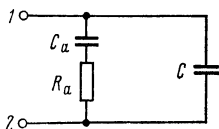


Рис. 1-7. Эквивалентная схема, объясняющая абсорбцию в конденсаторах.

C — основная емкость; C_a — абсорбционная емкость; R_a — эквивалентное сопротивление абсорбции.

ным диэлектриком, с неоднородностями диэлектрика и т. д. и называется диэлектрической абсорбцией.

Явление абсорбции в первом приближении можно объяснить, пользуясь эквивалентной схемой, изображенной на рис. 1-7. При замыкании накоротко на малое время выводов 1—2 обкладок успевает полностью разрядиться только основная, «геометрическая» емкость C , обусловленная быстрой поляризацией. Однако в

диэлектрике (особенно в неоднородном) на поверхностях раздела, на неоднородностях и в некоторых других случаях накапливаются объемные заряды, на образование которых затрачивается значительное время, измеряемое иногда десятками минут. Наличие таких зарядов на

рис. 1-7 отражено некоторой абсорбционной емкостью C_a , подключенной к основной через эквивалентное сопротивление R_a . Емкость C_a за время закорачивания обкладок конденсатора не успевает разрядиться полностью, и оставшийся после размыкания обкладок заряд распределяется между C_a и C , создавая на выводах 1—2 некоторое напряжение. Приведенная эквивалентная схема замещения, конечно, является упрощенной. Так как объемные заряды в диэлектрике могут образовываться в силу различных причин, то вместо одной абсорбционной цепочки $C_a—R_a$ более правильно использовать некоторый набор таких цепочек, каждая из которых будет соответствовать определенному виду замедленной поляризации. Наличие абсорбции будет сказываться и на процессе заряда конденсатора. Зависимость зарядного тока абсорбции от времени можно выразить эмпирическим соотношением

$$i_a = \sum_{i=1}^n I_{\max i} e^{-\frac{t}{\theta_i}}, \quad (1-7)$$

где $I_{\max i}$ — амплитуда тока i -й экспоненциальной составляющей тока; θ_i — постоянная времени i -й экспоненциальной составляющей тока.

Знак суммы учитывает наличие нескольких упомянутых выше абсорбционных цепочек. Складываясь со значениями тока через конденсатор, обусловленными быстрой поляризацией и утечкой, абсорбционные токи могут существенно исказить форму тока через конденсатор.

Величину абсорбции количественно характеризуют коэффициентом абсорбции [1]

$$K_a = \frac{U_2}{U_1} 100\%, \quad (1-8)$$

где U_1 — напряжение на обкладках конденсатора до закорачивания при его зарядке в течение 15 мин; U_2 — напряжение, восстановившееся на обкладках конденсатора через 3 мин после того, как он был закорочен на 5 с.

Таким образом, коэффициент абсорбции показывает, какая часть общего заряда, запасенного диэлектриком при его поляризации, отдается в процессе восстановления напряжения.

Значение коэффициента абсорбции, определенное указанным выше способом, является относительным, так как при других значениях времени заряда, закорачивания и восстановления будут получены значения, отличающиеся от полученных по формуле (1-8*). Явление абсорбции необходимо учитывать при работе с высоковольтными конденсаторами, на обкладках которых после их кратковременного разряда может восстановиться опасное для жизни напряжение.

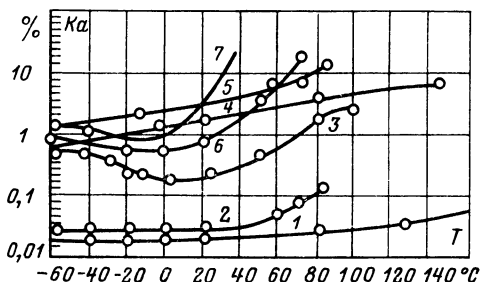


Рис. 1-8. Зависимость коэффициента абсорбции от температуры.

1 — конденсатор с диэлектриком из фторопласта-4; 2 — конденсатор с диэлектриком из полистирола; 3 — конденсатор с диэлектриком из полиэтилентерефталата; 4 — объемнопористый танталовый электролитический конденсатор; 5 — слюдяной конденсатор; 6 — бумажный конденсатор, пропитанный вазелином; 7 — металлобумажный конденсатор, пропитанный церезином.

В табл. 1-8 приведены значения коэффициента абсорбции для конденсаторов некоторых типов, а на рис. 1-8 — зависимость коэффициента абсорбции от температуры.

Абсорбция электрических зарядов вызывает уменьшение емкости при повышении рабочей частоты, неполную отдачу энергии накопительным конденсатором при его разряде и появление нежелательной задержки во времени в некоторых импульсных схемах или цепях, требующих быстрой смены заряда и разряда конденсатора.

* Более подробно об определении коэффициента абсорбции см. в книге С. Л. Эпштейна «Измерение характеристик конденсаторов», Л., «Энергия», 1971. Прим. ред.

Значения коэффициентов абсорбции для некоторых типов конденсаторов при температуре +20°C

Тип диэлектрика	Тип конденсатора	Коэффициент абсорбции, %
Полистирольная пленка	ПСО, ПО, ПМ, МПГ, МПГО, К71-3, К71-4, К71-5 и др.	0,03—0,1
Пленка фторопласт-4	ФТ, К72П-6, ФГТИ, К72-11	0,01—0,1
Полиэтилентерефталатная пленка	ПМГЦ, ПМГП, К73П-2	0,2—0,8
Бумага с неполярной пропиткой	КБГ, К50П-2, К40У-5, К40У-9 и др.	0,6—2
Металлобумажные конденсаторы, пропитанные церезином	МБГ, МБГО, МБГИ, МБГТ, МБМ, К42-11, К42У-2 и др.	2—5
Слюда	КСО, КСОТ, КСГ, СГМ, К31У-3 и др.	2—5
Оксид тантала	К52-1, ЭТО, К53-1	0,6—2,5
Оксид алюминия	К50-3, К50-6, К50-7, К50-24, К50-20, К50-22	5—6
Керамика Т-150	Группа ТКЕ М1500	2—5
Керамика Т-900	Группа Н30	До 15

1-5. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ

При эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры под воздействием переменного напряжения конденсатор может существенно нагреваться, что создает опасность выхода его из строя. Поэтому важно знать мощность, которая может рассеиваться в конденсаторе при его работе на переменном токе в реальных условиях эксплуатации.

Часть подводимой к конденсатору электрической энергии, рассеиваемой им, называется потерями энергии конденсатора. В общем случае потери энергии складываются из потерь в диэлектрике и потерь в проводящих частях конденсатора.

Потери энергии в диэлектрике возникают за счет токов утечки, замедленных поляризационных процессов, частичных разрядов в масляных прослойках или газовых полостях диэлектрика и т. д.

Потери энергии в проводящих частях конденсатора возникают от нагрева током обкладок контактов и выводов, от вибрации обкладок и т. д. При напряжении синусоидальной формы в качестве критериев потерь энер-

гии в конденсаторе обычно используют угол потерь δ , коэффициент мощности или $\cos \varphi$, тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$.

На рис. 1-9 приведена векторная диаграмма, показывающая фазовый угол сдвига φ между напряжением и током, который для реального конденсатора, обладающего потерями, менее 90° .

Отношение мощности, затраченной в конденсаторе за один период P_A , к мощности, запасенной в нем за один период P_R , называется коэффициентом мощности конденсатора

$$\frac{P_A}{P_R} = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \cos \varphi, \quad (1-9)$$

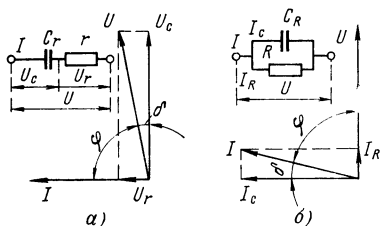


Рис. 1-9. Эквивалентные последовательная (а) и параллельная (б) схемы замещения конденсатора с потерями.

r и R — сопротивления, эквивалентные потерям в конденсаторе, Ом; C_r и C_R — эквивалентные емкости, Ф; U — напряжение частоты ω ; I — ток через конденсатор.

т. е. косинус фазового угла потерь равен коэффициенту мощности. Угол δ , дополняющий фазовый угол до 90° , называется углом потерь. Очевидно, что $\sin \delta$ равен коэффициенту мощности.

Во многих случаях угол потерь δ так мал, что можно принять $\sin \delta \approx \operatorname{tg} \delta$, т. е. выражать потери через тангенс угла потерь. Конденсатор, обладающий потерями на частоте $\omega = 2\pi f$ (где f — линейная частота) синусоидального напряжения, можно представить в виде последовательной (рис. 1-9, а) или параллельной (рис. 1-9, б) схемы замещения [1].

Для последовательной схемы

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{Ir}{I/\omega C_r} = r\omega C_r. \quad (1-10)$$

Для параллельной схемы

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C_R} = \frac{1}{\omega C_R R}. \quad (1-11)$$

Если параллельная и последовательная схемы замещения соответствуют одному и тому же конденсатору, то

их параметры связаны между собой следующими соотношениями:

$$r = \frac{R}{1 + R^2 \omega^2 C_R^2} = \frac{R}{1 + 1/\operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (1-12)$$

$$C_r = \frac{1 + R^2 \omega^2 C_R^2}{R^2 \omega^2 C_R} = C_R (1 + \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (1-13)$$

Значение $\operatorname{tg} \delta$ может зависеть от температуры, частоты и приложенного напряжения. Для конденсатора каж-

Таблица 1-9

Максимально допустимые по ТУ значения $\operatorname{tg} \delta$ для некоторых типов конденсаторов

Тип конденсатора	Максимальная температура	Частота измерения, Гц	Значения $\operatorname{tg} \delta$	
			при 20°C	при $t_{\text{макс}}$
Керамический высокочастотный	85—155	10 ⁶	0,001—0,0015	0,0015—0,0025
Керамический низкочастотный	85	10 ³	0,01—0,035	0,02—0,07
Комбинированный К75-10	100	50	0,008	0,02
Комбинированный К75-12	100	10 ³	0,01	0,02
Фторопластовый ФЧ	155	10 ³	0,0005	0,001
Фторопластовый К72П-6, К72-11	200	10 ³	0,001	0,0015
Слюдяной КСО	70	10 ⁶	0,001—0,002	0,002—0,004
Стеклоэмалевый	85	10 ⁶	0,0015	0,0018
Полистирольный	60	10 ⁶	0,001	0,0015
Бумажный КБГ	70	50—10 ³	0,01	—
Металлобумажный К42У-2	35	50	0,008	—
Металлобумажный МБГ	70	50—10 ³	0,015	—
Электролитический алюминиевый:				
ЭМ на 150 В	60	50	0,1	—
ЭМ на 150 В	60	50	0,15	—
Электролитический танталовый объемопористый К52-1А	85	50	0,15	—
Электролитический танталовый объемопористый К52-2А	200	50	0,3	—
Оксиднополупроводниковый К53-7	85	50	0,06	—
Оксиднополупроводниковый К53-1А, К53-6А	125	50	0,08	—
Оксиднополупроводниковый К53-А	85	50	0,2	—
Лакопленочный К76П-1	70	10 ³	0,01	0,02
Лакопленочный К76-2	85	10 ³	0,01	0,02

дого типа эти зависимости имеют свой специфический характер. Характер температурной зависимости определяется зависимостью $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика конденсатора, так как потери в проводящих металлических частях относительно мало зависят от температуры (исключение составляют конденсаторы с оксидным диэлектриком).

Частотный ход тангенса угла суммарных потерь может иметь довольно сложный вид. В технических условиях на конденсаторы значение $\operatorname{tg} \delta$ обычно приводят

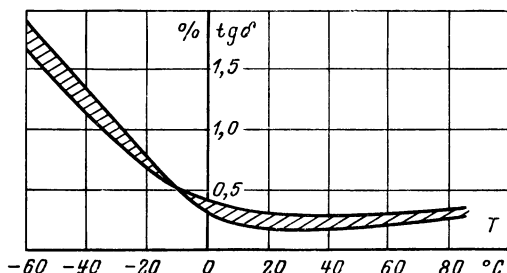


Рис. 1-10. Область изменения тангенса угла потерь металlobумажных конденсаторов на частоте 50 Гц в зависимости от температуры.

с обязательным указанием температуры, частоты и напряжения, при которых производят измерения, а иногда приводят также частотные и температурные зависимости $\operatorname{tg} \delta$.

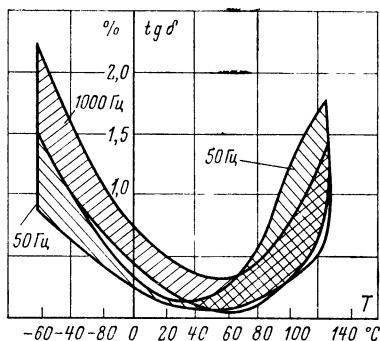


Рис. 1-11. Область изменения тангенса угла потерь конденсаторов с комбинированным диэлектриком (ПЭТФ+бумага) и фольговыми обкладками в зависимости от температуры.

В табл. 1-9 приведены значения $\operatorname{tg} \delta$ для некоторых типов конденсаторов, на рис. 1-10—1-19 — температурные и частотные зависимости $\operatorname{tg} \delta$.

На величину общих потерь конденсатора оказывают влияние и потери в паразитных емкостях, образуемых

конструктивными изоляционными материалами — компаундами, лаками, эмалями, пластмассами и т. д. Это влияние становится особенно заметным при малых значениях основной емкости конденсатора.

Определяющей причиной возрастания $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов с увеличением приложенного напряжения является ионизация газовых включений внутри диэлектрика

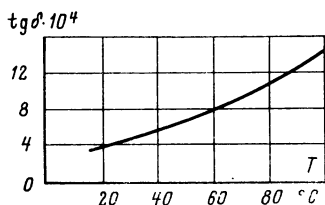


Рис. 1-12. Характер изменения тангенса угла потерь слюдяных конденсаторов в зависимости от температуры.

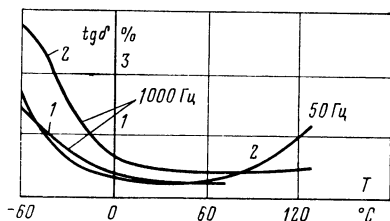
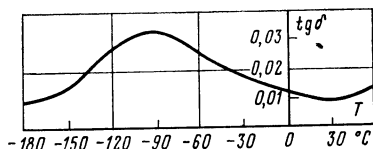


Рис. 1-13. Характер изменения тангенса угла потерь бумажных конденсаторов в зависимости от температуры на частоте 1000 Гц и 50 Гц.

1 — пропитка вазелиновым маслом;
2 — пропитка октолом.

или у краев электродов. Рост потерь в этом случае начинается только после превышения напряжения ионизации. Обычно рабочее напряжение конденсатора выбирается ниже напряжения начала ионизации и на прак-

Рис. 1-14. Характер изменения тангенса угла потерь металлобумажных конденсаторов в зависимости от температуры на частоте 1000 Гц.



тике возрастание $\operatorname{tg} \delta$ с напряжением встречается очень редко. Исключение составляют сегнетокерамические конденсаторы, имеющие явно выраженную зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряженности электрического поля.

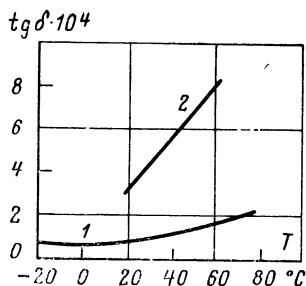


Рис. 1-15. Характер изменения тангенса угла потерь полистирольных конденсаторов в зависимости от температуры на частоте 1000 Гц.

1 — фольговые; 2 — металлизированные.

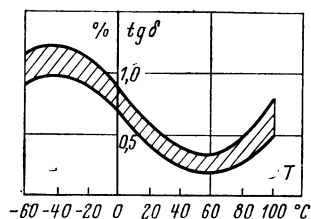


Рис. 1-16. Область изменения тангенса угла потерь полиэтилентерфталатных фольговых конденсаторов в зависимости от температуры на частоте 1000 Гц.

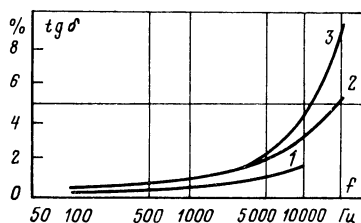


Рис. 1-17. Характер изменения тангенса угла потерь металлобумажных конденсаторов в зависимости от частоты.

1 — с полужидкой пропиткой при температуре 20°C; 2 — с твердой пропиткой при температуре 20°C; 3 — с твердой пропиткой при температуре 70°C.

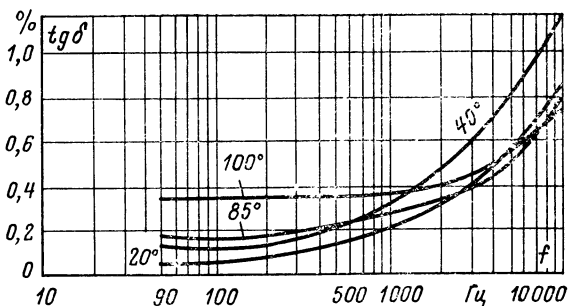


Рис. 1-18. Характер изменения тангенса угла потерь конденсаторов К75-10 в зависимости от частоты при различных температурах.

При применении параллельного и последовательного соединений двух конденсаторов можно подсчитать $\operatorname{tg} \delta$ общей системы:

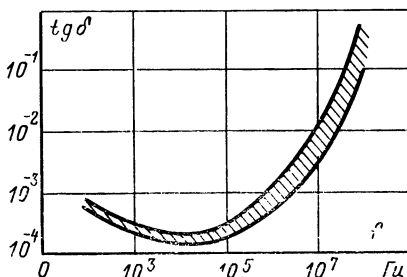
для параллельного соединения по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}, \quad (1-14)$$

для последовательного соединения по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_2 + C_2 \operatorname{tg} \delta_1}{C_1 + C_2}. \quad (1-15)$$

Рис. 1-19. Область изменения тангенса угла потерь фторопластовых конденсаторов в зависимости от частоты при комнатной температуре.



Зная $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора, легко найти его активную мощность

$$P_A = UI \cos \varphi = U^2 \omega C_r \cos \varphi = P_R \cos \varphi = \frac{P_R \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (1-16)$$

При $\operatorname{tg} \delta \ll 1$

$$P_A \approx U^2 \omega C_r \operatorname{tg} \delta = P_R \operatorname{tg} \delta. \quad (1-17)$$

Величину $\omega U^2 C_r = P_R$ называют реактивной мощностью конденсатора. При этом $\operatorname{tg} \delta$ выражается как отношение активной мощности потерь конденсатора к его реактивной мощности при синусоидальном напряжении. Реактивная мощность, на которую нагружается конденсатор при эксплуатации, не должна превышать допустимого по ТУ значения. Допустимое значение реактивной мощности определяется при разработке конденсатора из условий его теплового баланса с окружающей средой так, чтобы превышение температуры конденсатора не достигало установленного значения, например для высоковольтных керамических конденсаторов превышение температуры перегрева не более $+50^\circ\text{C}$.

Для конденсаторов на напряжение до 1000 В допустимая реактивная мощность указывается при макси-

мальной рабочей температуре, для конденсаторов на напряжение свыше 1000 В — при некоторой определенной температуре, свыше которой конденсаторы должны эксплуатироваться при меньших значениях реактивной мощности. Эта температура, а также снижение реактивной мощности оговариваются в ТУ на конденсаторы. Величина реактивной мощности может превышать номинальное значение при низкой температуре окружающей

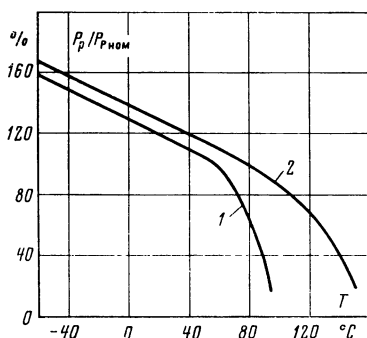


Рис. 1-20. Характер изменения допустимой реактивной мощности конденсаторов K15Y-1, K15Y-2 и K15Y-3 в зависимости от температуры.

1 — для конденсаторов группы M750; 2 — для конденсаторов остальных групп.

среды, а также при применении принудительного охлаждения конденсаторов, например при обдуве воздухом. Условия эксплуатации конденсаторов при принудительном охлаждении должны быть согласованы с предприятием — изготовителем конденсаторов. Для примера на рис. 1-20 приведена зависимость допускаемой ТУ реактивной мощности конденсаторов K15Y от температуры окружающего воздуха.

Максимально допускаемое значение реактивной мощности P_p может быть достигнуто лишь в определенном диапазоне частот (от f_n до f_b), так как при частотах ниже f_n реактивная мощность ограничивается рабочим напряжением конденсатора (т. е. при $f < f_n 2\pi f U^2 C < P_p$). Уменьшение допускаемой реактивной мощности при частотах выше f_b обусловливается ростом потерь в металлических частях конденсатора, вызывающих его перегрев. Во избежание такого перегрева обычно верхний предел допустимого значения тока ограничивается техническими условиями на конденсаторы.

Следует учитывать, что выражения (1-16), (1-17) справедливы только при синусоидальном напряжении.

1-6. СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ

После окончания процесса заряда конденсатора проходящий через него ток принимает некоторое конечное значение, называемое током утечки. Ток утечки обусловлен наличием в диэлектрике свободных носителей заряда, а также проводимостью участка поверхности конденсатора между выводами.

Отношение приложенного к конденсатору напряжения постоянного тока U к току утечки $I_{ут}$ через 60 с после установления на конденсаторе измерительного напряжения определяет значение сопротивления изоляции

$$R_{из} = U/I_{ут}. \quad (1-18)$$

Следует отметить, что для конденсаторов, обладающих абсорбцией, ток утечки спадает до конечного значения в течение времени, иногда значительно превышающего 1 мин, и сопротивление изоляции в этом случае будет лежать ниже общего уровня изоляции таких конденсаторов в установившемся режиме постоянного тока.

Сопротивление изоляции измеряют в мегомах (МОм), гигаомах (ГОм) и тераомах (ТОм)

$$1 \text{ ТОм} = 10^3 \text{ ГОм} = 10^6 \text{ МОм} = 10^{12} \text{ Ом}.$$

Минимально допустимые стандартами и техническими условиями значения сопротивления изоляции при комнатной температуре в зависимости от типа конденсатора следующие: 10^2 — 10^4 МОм для керамических низкочастотных конденсаторов; 10^4 — 10^5 МОм для керамических высокочастотных; $7,5 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^4$ МОм для слюдяных; до 10^8 МОм для пленочных и металлопленочных; $5 \cdot 10^3$ — 10^5 МОм для бумажных; $2 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^4$ МОм для металlobумажных. При повышении температуры конденсатора увеличивается активная удельная проводимость диэлектрика, что приводит к снижению сопротивления изоляции. Зависимость сопротивления изоляции от температуры в первом приближении можно описать эмпирическим выражением

$$\lg R_2 = \lg R_1 - \beta(T_2 - T_1), \quad (1-19)$$

где R_1 — сопротивление изоляции в МОм при температуре T_1 ; R_2 — сопротивление изоляции при температуре T_2 ; β — постоянный коэффициент.

Коэффициент β зависит от вида диэлектрика и принимает значения 0,01—0,02 (для конденсаторов с неор-
3—605

ганическим диэлектриком и электролитических) и 0,3—0,4 (для конденсаторов с органическим диэлектриком). Для бумажных, керамических и других конденсаторов большой емкости обычно указывают значение постоянной времени — произведения сопротивления изоляции в мегомах на емкость в микрофарадах.

Для бумажных герметизированных конденсаторов минимально допустимое значение постоянной времени обычно составляет 2000 МОм·мкФ при 20°C, для метал-

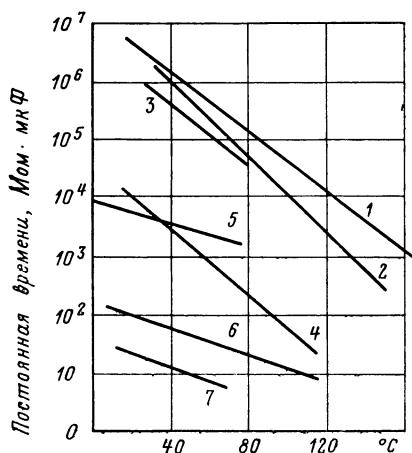


Рис. 1-21. Характер изменения постоянной времени различных конденсаторов в зависимости от температуры.

1 — фторопластовый конденсатор; 2 — полиэтилентерефталатный; 3 — полистирольный; 4 — бумажный с неполярной пропиткой; 5 — слюдяной; 6 — электролитический танталовый сухой; 7 — электролитический алюминиевый сухой.

лобумажных на номинальные напряжения 160 и 250 В $RC=200$ МОм·мкФ; на 200 В $RC=300$ МОм·мкФ; на 400 В и более $RC=1000$ МОм·мкФ. Такое различие допускаемых значений постоянной времени для металлобумажных конденсаторов объясняется разным числом слоев бумаги и лакировки в них для различных номинальных напряжений.

При повышении температуры значение постоянной времени снижается (рис. 1-21). Зависимость постоянной времени металлобумажных конденсаторов от температуры достаточно хорошо описывается выражением

$$(RC)_{T_1} = (RC)_{T_2} + \exp a(T_1 - T_2), \quad (1-20)$$

где $(RC)_{T_1}$ — постоянная времени при температуре T_1 ; $(RC)_{T_2}$ — постоянная времени при температуре T_2 ; a — коэффициент, равный 0,075 для конденсаторов на напряжении до 400 В и 0,086 на напряжения 400 В и более.

При низких температурах значения сопротивления изоляции и постоянной времени могут оказаться несколько ниже, чем следовало бы ожидать из формул (1-19), (1-20), так как основную роль будут играть поверхностные утечки, а не объемное сопротивление диэлектрика.

Для электролитических конденсаторов основной характеристикой электрической изоляции является ток утечки, величина которого может быть от долей микроампера (танталовые конденсаторы) до нескольких миллиампер (алюминиевые конденсаторы).

Для большинства электролитических конденсаторов максимально допустимый ток утечки при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ можно определить по формуле

$$I = kCU + m, \quad (1-21)$$

где I — ток утечки, мА; m , k — коэффициенты, зависящие от типа и емкости конденсатора; C — емкость, мкФ; U — напряжение, В.

Значения коэффициентов, входящих в выражение (1-21), для электролитических конденсаторов некоторых типов приведены в табл. 1-10.

Таблица 1-10

Значения коэффициентов k и m некоторых конденсаторов с оксидным диэлектриком

Тип конденсатора	k	m	Примечание
К50-3:			
$CU \leq 200$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	—
$CU \geq 200$	10^{-4}	0	—
К50-6	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	—
К50-7	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-2}$	—
К50-9	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	При $U_H = 3$ В
	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3}$	При $U_H = 6$ В
ЭТ, ЭТН	$5 \cdot 10^{-5}$	0	
К52-1, К52-1А	$2 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	При $T = +85^{\circ}\text{C}$ ток утечки увеличивается примерно в 3 раза
К53-8	10^{-4}	10^{-2}	При $T = +85^{\circ}\text{C}$; $k = 10^{-4}$; $m = 4 \cdot 10^{-2}$
К53-11	10^{-5}	0	—
К53-12	$2 \cdot 10^{-4}$	0	—

Ток утечки электролитических конденсаторов возрастает по мере увеличения температуры и может вызывать сильный разогрев конденсатора.

Увеличение тока утечки происходит и при длительном хранении конденсаторов из-за так называемой «расформовки», т. е. процесса «ослабления» оксидной пленки на аноде в результате взаимодействия рабочего электролита с оксидным слоем, который частично растворяется. С другой стороны, наличие микродефектов в оксидном слое, определяемых количеством и составом примесей на вентильном металле анода, также влияет на степень расформовки. Совокупность этих факторов обуславливает причину нестабильности тока утечки у электролитических конденсаторов в процессе их длительного хранения.

Для устранения явления «расформовки» в технических условиях на электролитические конденсаторы рекомендуется производить тренировку конденсаторов номинальным напряжением перед их установкой в аппаратуру.

В том случае, если в аппаратуре, находящейся на складском хранении, имеются вмонтированные электролитические конденсаторы, то в процессе проведения профилактических работ рекомендуется аппаратуру включать на время 10—15 мин в зависимости от сроков ее хранения.

Сопротивление изоляции необходимо учитывать в первую очередь при эксплуатации конденсаторов на постоянном токе и низких частотах. Для конденсаторов, применяемых для разделения цепей по переменному току, например между сеткой и анодом в усилителе, и во временных цепях сопротивление изоляции должно быть достаточно большим, так как его снижение может вызвать нарушение нормальной работы всего устройства. Для блокировочных и фильтровых конденсаторов допустимы меньшие значения сопротивления изоляции.

1-7. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Электрическая прочность является важнейшей характеристикой конденсаторов¹ и зависит прежде всего от толщины и качества диэлектрика, разделяющего обклад-

¹ Не следует смешивать электрическую прочность диэлектрика $E_{пр}$, когда имеется в виду электрический пробой в однородном электрическом поле, с «электрической прочностью» конденсаторов различного типа. В последнем случае этот термин следует понимать чисто условно, применительно к пробивному напряжению, при котором конденсатор данного типа выходит из строя. Прим. ред.

ки. Кроме того, эта характеристика зависит от особенностей конструкции конденсаторов, технологических режимов их изготовления и условий эксплуатации.

Электрическая прочность диэлектрика характеризуется величиной пробивной напряженности $E_{пр}$, представляющей собой отношение пробивного напряжения $U_{пр}$ к толщине диэлектрика d :

$$E_{пр} = U_{пр}/d. \quad (1-22)$$

Как известно, в конденсаторостроении применяются газообразные, жидкие и твердые диэлектрики.

Пробой газообразных диэлектриков носит чисто электрический характер. Согласно теории ударной ионизации пробой газа происходит тогда, когда кинетическая энергия свободных ионов (электронов), движущихся в газе под воздействием электрического поля, достигает значений, достаточных для ионизации молекул при столкновении, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы или их возбуждение, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту. При этом происходит лавинообразное нарастание числа свободных ионов в газе и его проводимость возрастает до больших значений, при которых происходит пробой газоразрядного промежутка.

В однородном поле пробой газа происходит практически мгновенно при достижении напряженности электрического поля строго определенного значения, зависящего от температуры и давления газа. Начальное пробивное напряжение зависит от произведения давления газа на расстояние между электродами при малых значениях этого произведения (закон Пашена). Как видно из рис. 1-22, в этой зависимости имеется минимум пробивного напряжения, соответствующий определенному для данного газа значению произведения $P\hbar$. Для электрической прочности газов характерно существование некоторого критического значения напряжения от 280 до 420 В для различных газов, ниже которого пробой не происходит независимо от давления или расстояния между электродами [1]. Поэтому при малых зазорах электрическая прочность газов оказывается повышенной. Так, например, если для воздуха в однородном поле при расстояниях между электродами порядка 1—10 мм электрическая прочность составляет всего 3 кВ/мм (амплитудное значение), то при зазоре 10 мкм она равняется

35 кВ/мм, так как критическое значение пробивного напряжения для воздуха составляет около 350 В (амплитудных).

Пробивное напряжение газа в переменном однородном поле зависит от его частоты. При небольших частотах оно совпадает с пробивным постоянным напряжением, с повышением частоты пробивное напряжение не-

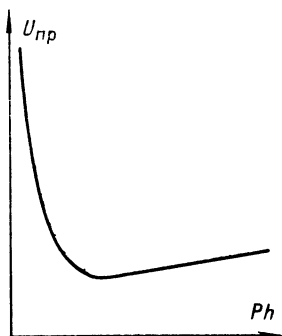


Рис. 1-22. Характер зависимости пробивного напряжения газов от произведения давления P на расстояние между электродами h при малых значениях Ph .

сколько уменьшается, достигая минимума при частоте около 5 МГц, после чего возрастает и достигает на частоте 100 МГц значения, превосходящего примерно в 1,5 раза пробивное напряжение постоянного тока.

В случае неоднородного переменного поля особенностью пробоя газа является возникновение короны в местах, где напряженность поля достигает критических значений. С возрастанием напряжения происходит переход короны в искровой разряд и, далее, в дугу.

Пробой газа в неоднородном поле при высоких частотах происходит при значительно меньших напряжениях, чем при постоянном напряжении или напряжении частоты 50 Гц. В этом случае пробивное напряжение мало возрастает с увеличением расстояния между электродами, а напряжение, соответствующее появлению короны, практически совпадает с пробивным.

Пробой воздуха по поверхности диэлектрика, часто называемый поверхностным перекрытием, возникает обычно при более низких напряжениях, чем для воздуха в однородном поле. На напряжение перекрытия влияют как форма электрического поля, определяемая конфигурацией электродов и диэлектрика, так и состояние поверхности диэлектрика, а также частота напряжения, температура и давление воздуха. Особо сильное влияние оказывает влажность воздуха: повышение относительной влажности воздуха от 60 до 80—90% может вызвать снижение напряжения перекрытия почти в 2 раза.

Изучение зависимости пробивного напряжения твердых диэлектриков от времени, температуры и ряда других факторов позволило установить наличие трех основных форм пробоя [1, 2, 3].

1. При электрической форме пробоя пробивное напряжение почти не зависит от температуры, времени (вплоть до значений порядка 10^{-6} — 10^{-7} с) и сильно зависит от степени однородности электрического поля.

При электрическом пробое в однородном поле пробивное напряжение линейно возрастает с увеличением толщины диэлектрика и электрическая прочность характеризуется постоянным значением пробивной напряженности $E_{пр}$. Значение $E_{пр}$ определяется химическим составом и структурой диэлектрика.

Электрический пробой происходит лишь в тех случаях, когда исключена возможность существенного разогрева диэлектрика и развития процессов старения. При эксплуатации конденсаторов с твердым диэлектриком электрического пробоя в чистом виде, как правило, не наблюдается за исключением пробоя при единичных импульсах напряжения с большой амплитудой и малой длительностью.

2. При электротепловой форме пробоя наблюдается резкое уменьшение пробивного напряжения от температуры.

Неоднородность электрического поля в диэлектрике при электротепловом пробое сказывается на пробивном напряжении в значительно меньшей степени, чем при электрическом пробое.

Электротепловой пробой наступает в результате прогрессирующего разогрева диэлектрика из-за выделения в нем джоулевых (в постоянном поле) или диэлектрических (в переменном поле) потерь. Если удельная электропроводность или потеря энергии возрастает с повышением температуры диэлектрика, то это ведет к дальнейшему росту температуры при данном значении напряжения.

При достаточно малых значениях напряжения повышение температуры с течением времени замедляется и в диэлектрике устанавливается стационарное тепловое равновесие: количество тепла, выделяющееся в диэлектрике, равняется количеству тепла, отводимому с его поверхности в пространство.

Электротепловой пробой может произойти по одной из следующих причин:

приложенное напряжение столь велико для данного диэлектрика, что тепловое равновесие не может быть достигнуто (электротепловой пробой I рода);

раньше, чем наступит тепловое равновесие, диэлектрик разогревается до температуры, вызывающей его разрушение (электротепловой пробой II рода);

из-за разогрева внутренних слоев диэлектрика распределение электрического поля искажается таким образом, что на наиболее холодных участках величина напряженности превышает значение электрической прочности диэлектрика (электротепловой пробой III рода).

Для большинства практических случаев вероятнее всего наличие электротеплового пробоя I рода.

Пробой II рода может иметь место для диэлектриков с очень низкой термостойкостью.

3. При длительном воздействии на диэлектрик постоянного напряжения, особенно при повышенных температурах, могут развиваться процессы, ухудшающие электрические параметры, постепенно снижающие электрическую прочность и завершающие их пробоем при напряжениях, значительно меньших, чем первоначальное пробивное напряжение. Некоторые из таких процессов носят электрохимический характер (например, электролитические процессы при увеличении тока утечки), в результате чего они иногда называются электрохимическим пробоем. Учитывая многообразие возможных процессов, следует рассматривать постепенное ухудшение свойств диэлектрика как электрическое старение.

Под электрическим старением обычно понимают ухудшение электрических характеристик диэлектрика с течением времени под воздействием электрического напряжения и температуры окружающей среды. Электрическому старению в той или иной степени подвержено большинство твердых диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении. Так, например, при воздействии постоянного напряжения в условиях повышенной температуры на бумажные конденсаторы, пропитанные хлорированными массами, из-за накопления в бумаге продуктов разложения пропитки HCl и Cl происходит увеличение проводимости, местное разрушение клетчатки и, в конечном счете, пробой конденсатора по одному из разрушенных мест [1]. Содержащиеся в бумаге загряз-

нения в виде следов хлоридов и сульфатов могут вызывать ее разрушение и при пропитке конденсаторов неполярными углеводородными массами. Химическое воздействие на бумагу или пропиточную массу могут также оказывать активный кислород и водород, образующиеся при электролизе присутствующих остатков воды.

Наиболее опасными для пленочных органических диэлектриков являются процессы ионизационного старения. Исследование старения пленок из полистирола, полиэтилентерефталата и политетрафторэтилена [4] показало, что основной причиной этого процесса являются частичные разряды, возникающие в газовых включениях. Частичные разряды могут возникать при воздействии как переменного, так и постоянного напряжения, превышающих значение начального напряжения ионизации. Было установлено, что скорость старения определяется частотой следования разрядов. При переменном напряжении частота следования разрядов, а следовательно, и скорость старения практически не зависят от температуры вплоть до 85°C для полистирола, 100°C для политетрафторэтилена и 150°C для полиэтилентерефталата. При постоянном напряжении наблюдается зависимость скорости старения от температуры, определяемая в первую очередь зависимостью удельной проводимости от температуры. Как в постоянном, так и в переменном электрических полях скорость старения зависит от напряжения и растет быстрее, чем частота следования частичных разрядов. Частичные разряды приводят к разрушению пленки, в результате чего уменьшаются ее толщина, вес и снижается кратковременное пробивное напряжение. Однако интенсивное разрушение пленки происходит только при наличии достаточного доступа кислорода в зону разрядов.

Значительная часть работ [4—6] по изучению старения диэлектриков относится к керамическим материалам.

Установлено [4], что в процессе электрического старения в постоянном электрическом поле монокристаллов TiO_2 , BaTiO_3 , SrTiO_3 , а также титансодержащих, станнатных и цирконатных диэлектриков наблюдается своеобразное изменение плотности тока от времени. В этой зависимости можно выделить четыре характерные зоны:

1. В начальный период после наложения электрической нагрузки плотность тока сохраняет постоянное значение или даже несколько уменьшается.

2. В дальнейшем происходит рост тока по степенному закону

$$i = At^B, \quad (1-23)$$

где A и B — коэффициенты, не зависящие от времени t .

3. В отдельных случаях наблюдается почти полное прекращение роста тока или небольшое его уменьшение.

4. Наконец, ток вновь резко увеличивается и процесс завершается пробоем диэлектрика.

На рис. 1-23 приведены примеры таких зависимостей для различных керамических диэлектриков. Изменения,

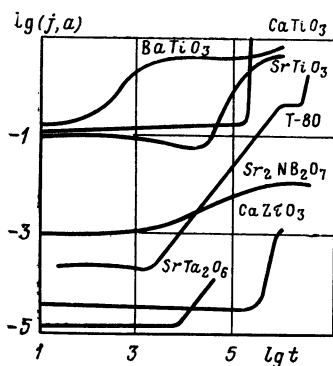


Рис. 1-23. Изменение плотности тока в керамических диэлектриках от времени воздействия постоянного электрического напряжения при повышенных температурах.

происходящие в процессе старения по крайней мере до третьего этапа, являются обратимыми — характеристики образцов восстанавливаются при прогреве в отсутствии электрического поля или при наложении напряжения противоположной полярности, чем то, которое было при старении.

В переменном электрическом поле на частоте 50 Гц процессы старения керамических материалов практически не наблюдаются.

Характерным видом пробоя является ионизационный пробой, связанный с развитием разрядов в остаточных

воздушных включениях в диэлектрике, у краев электродов или в прослойках пропиточной и заливочной жидкости. Ионизационный пробой может развиваться как при кратковременном, так и при длительном воздействии напряжения.

Ионизационный пробой керамики нередко связывают с механическим разрушением образца, вызванным местными напряжениями в диэлектрике из-за разогрева пор в процессе ионизации. Такой вид пробоя получил название электротермомеханического [7]. Его появление возможно только для керамических конденсаторов с порами диаметром около 1 мм, т. е. с заведомо дефектным диэлектриком. Усталостные явления в материале, вызыва-

емые механическими напряжениями, возникающими из-за различия температуры между нагретыми центральными областями и более холодной поверхностью, также могут явиться причиной нарушения механической прочности керамики и ее последующего пробоя. Этот вид пробоя называют термоупругим.

Оценку электрической прочности конденсаторов производят по следующим видам напряжений:

$U_{пр}$ — пробивное напряжение, при котором конденсатор пробивается в течение нескольких секунд (для отдельных образцов одного и того же типа конденсатора обычно наблюдается довольно большой разброс значений пробивного напряжения).

$U_{исп}$ — испытательное напряжение, которое конденсатор должен выдержать в течение короткого времени (обычно 10 с), воздействию испытательного напряжения подвергается каждый изготавливаемый конденсатор, при этом часть образцов с низкой электрической прочностью отбраковывается из-за пробоя.

$U_{раб}$ — рабочее напряжение, при котором конденсатор может надежно работать длительный промежуток времени. Время работы конденсатора до выхода его из строя (его долговечность) устанавливается с учетом области его применения. Во многих случаях рабочее напряжение может совпадать с напряжением, указываемым в маркировке конденсатора и называемым номинальным напряжением $U_{ном}$. Однако номинальное напряжение устанавливается для определенного вида напряжения — постоянного, переменного или импульсного и для конкретных условий эксплуатации.

Рабочее напряжение в зависимости от его вида и условий эксплуатации, как правило, составляет часть номинального напряжения, но в ряде случаев, например при сокращенных сроках службы, при температурах, пониженных по сравнению с максимальной температурой, допускаемой техническими условиями, оно может превышать номинальное напряжение. Эти условия оговариваются ГОСТ или техническими условиями на конденсаторы данного типа.

Испытательное напряжение выбирается, исходя из запаса кратковременной электрической прочности конденсатора.

Наибольшим запасом электрической прочности отличаются конденсаторы с органическим диэлектриком, что

и определяет для них большие значения испытательного напряжения. Испытательное напряжение бумажных конденсаторов на напряжение до 1500 В по отношению к номинальному напряжению устанавливается равным $3U_{\text{ном}}$ на 1500 В и выше — $2U_{\text{ном}}$.

Для металлопленочных и металlobумажных конденсаторов, в связи с их способностью к самовосстановлению при пробое, устанавливается меньший запас электрической прочности, чем для конденсаторов с органическим диэлектриком и фольговыми обкладками, что определяет для них и меньшие значения испытательного напряжения, равного обычно $1,5U_{\text{ном}}$.

Для керамических конденсаторов испытательное напряжение устанавливается в зависимости от значения номинального напряжения:

$U_{\text{ном}}$ до 350 В	$U_{\text{исп}}=3U_{\text{ном}}$
$U_{\text{ном}}=350\div 1000$ В	$U_{\text{исп}}=2,5 U_{\text{ном}}$
$U_{\text{ном}}=1000\div 3000$ В	$U_{\text{исп}}=1,5 U_{\text{ном}}+500$ В
$U_{\text{ном}}=3\div 20$ кВ	$U_{\text{исп}}=1,5 U_{\text{ном}}$

Для слюдяных, стеклокерамических и стеклоэмалевых конденсаторов испытательное напряжение обычно выбирается в 2 раза больше номинального.

Ограниченный запас электрической прочности электролитических конденсаторов обуславливает и низкие испытательные напряжения:

$U_{\text{ном}}$ до 350 В	$U_{\text{исп}}=1,15 U_{\text{ном}}$
$U_{\text{ном}}$ свыше 350 В	$U_{\text{исп}}=1,1 U_{\text{ном}}$

Испытательным напряжением на заводах-изготовителях обычно проверяются все выпускаемые конденсаторы (испытание на электрическую прочность), что позволяет отбраковывать образцы с особо грубыми дефектами. Это, однако, не обеспечивает безотказность при эксплуатации всех конденсаторов, выдержавших испытание. У конденсаторов, истинное пробивное напряжение которых немного превышало испытательное, воздействие испытательного напряжения может вызвать необратимые изменения в диэлектрике, снижающие запас электрической прочности. При повторном испытании на электрическую прочность такие конденсаторы могут выйти из строя. Эксперименты показывают, что если достаточно большую партию конденсаторов неоднократно испыты-

вать одним и тем же испытательным напряжением, то при последующих испытаниях всегда появляется некоторое количество пробитых образцов.

Исходя из сказанного, количество испытаний конденсаторов на электрическую прочность следует стремиться уменьшить (например, до двух: на заводе — изготовителе конденсаторов и при входном контроле на заводе — потребителе). При входном контроле рекомендуется проводить испытание конденсаторов всех типов на кратковременную электрическую прочность при испытательном напряжении не выше $1,15U_{\text{ном}}$.

1-8. ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Если считать, что работа конденсатора описывается последовательной эквивалентной схемой замещения, показанной на рис. 1-24, где L — индуктивность проводящих частей, то полное сопротивление конденсатора Z будет равно:

$$z = \sqrt{r^2 + (X_C - X_L)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC} - 2\pi fL\right)^2}. \quad (1-24)$$

Как видно из рис. 1-24, емкостное сопротивление конденсатора X_C снижается с увеличением частоты, а индуктивное X_L возрастает. Левая ветвь кривой полного сопротивления, следовательно, определяется емкостью конденсатора, правая — его индуктивностью, а минимум полного сопротивления — активным сопротивлением конденсатора. Соответствующая минимуму частота является резонансной и определяется по формуле

$$f_p = 1/2\pi\sqrt{LC}. \quad (1-25)$$

При частотах выше резонансной сопротивление конденсатора является уже не емкостным, а индуктивным, вследствие чего эффективное использование конденсатора может быть только на частотах ниже резонансной. При увеличении частоты (до резонансной) кажущаяся емкость может увеличиваться из-за частичной компенсации емкостного сопротивления конденсатора индуктивным. Это изменение емкости можно определить по формуле

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{4\pi^2 f^2 LC}{1 - 4\pi^2 f^2 LC}, \quad \%. \quad (1-26)$$

При использовании формул (1-24) — (1-26) необходимо подставлять значение емкости в фарадах, индуктивности в генри, сопротивление в омах. Для реальных конденсаторов зависимость полного сопротивления от частоты может несколько отличаться от показанной на рис. 1-24. В качестве примера на рис. 1-25 приведены подобные зависимости для помехозащитных конденсаторов КЗ и К75П-4. В табл. 1-11 приведены ориентировоч-

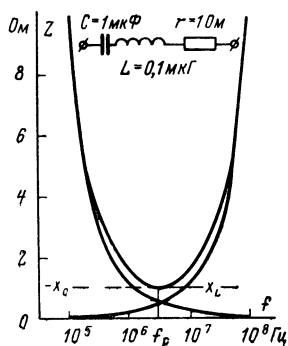


Рис. 1-24. Характер изменения полного сопротивления конденсатора в зависимости от частоты.

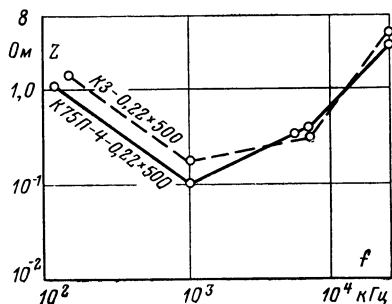


Рис. 1-25. Характер изменения полного сопротивления конденсаторов КЗ и К75П-4 в зависимости от частоты.

ные значения индуктивности и резонансной частоты для некоторых типов конденсаторов. Необходимо отметить, что в реальных условиях резонансная частота конденсатора может лежать несколько ниже из-за индуктивности соединительных проводов, которыми он присоединяется к схеме.

К конденсаторам, работающим в импульсных и высокочастотных схемах, предъявляются жесткие требования. Собственная индуктивность конденсаторов должна быть минимальной. Это объясняется тем, что при разряде конденсатора как в аperiodическом, так и колебательном режимах скорость изменения тока достигает большого значения, что эквивалентно высокой частоте. Наличие даже малой собственной индуктивности в конденсаторе вызывает большое индуктивное сопротивление ωL , которое способствует уменьшению разрядного тока и сказывается на его форме.

Значения индуктивности и резонансной частоты некоторых конденсаторов

Тип конденсатора	Емкость	Индуктивность, нГ	Резонансная частота, МГц
КД-1, КД2А	1—270 пФ 680—6800 пФ	1—4 1—4	5000—150 200—30
КД-2в, К10-2	—	—	1000
КТ-1, КТ-2, КТ-3	1—1000 пФ 1100—33 000 пФ	3—15	3000—40 100—20
К10У-2	1,5—100 пФ 22—3600 пФ	0,25—17 2—5	1000 800—300
КМ-3, КМ-4, КМ-5	3900—15 000 пФ		60—100
КВИ	1,5—4700 пФ	1—3	4000—40
К15У-1	10—4700 пФ	1,5—4	1300—25
К15У-2	47—10 000 пФ	1,5—4	600—25
КСО-1,2,5; КСОТ; СГМ; СКС; СКМ	10—180 пФ 200—1000 пФ		1000—250 200—100
	1100—5100 пФ	3—5	75—40
	5600—10 000 пФ		30—15
КСО-6, КСО-13	10—180 пФ 200—1000 пФ		300—100 100—50
	1100—5100 пФ	8—15	50—25
	5600—20 000 пФ		20—10
	22 000—50 000 пФ		10—6
КБГ-И, БМ, БГМ	100—1000 пФ		30—100
КБГ-М, МБГИ	1100—5100 пФ	3—5	75—30
	5600—200 000 пФ		30—10
МБМ, ПМ, ПСО, ФТ	22 000—50 000 пФ	6—10	15—7
МПГ, МПО, МПГ	0,1—0,5 мкФ		5—2
К40У-9, К73П-6	0,68—1,0 мкФ		2—1,5
КБГ-МП, КБГ-МН, БГТ, МБГП, МБГО	0,25—1 мкФ 2,0—5 мкФ	15—20 20—40	2,5—1,0 0,7—0,35
МБГТ, МПГ, МПГО, ПМГП, К73П-2	6,0—25,0 мкФ	50—100	0,3—0,1
Танталовые оксидно- полупроводниковые с проволочным анодом	0,033—1 мкФ	5—10	12—1,5
ЭТО-1, ЭТО-2	1—10 мкФ 10—80 мкФ 100—1000 мкФ	3—5 5—10 15—20	3—0,7 0,7—0,2 0,15—0,035

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРОВ ОСНОВНЫХ ТИПОВ

2-1. КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Отечественной промышленностью выпускаются конденсаторы с твердым органическим и неорганическим, оксидным и газообразным диэлектриками.

Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком изготавливают обычно намоткой тонких длинных лент конденсаторной бумаги, пленок или их комбинации, разделенных металлическими электродами.

В современном конденсаторостроении можно получать бумагу и ряд пленочных диэлектриков толщиной 4—5 мкм, а при использовании специальных технологических приемов — толщиной 1,5—3 мкм. Кратковременная электрическая прочность органических диэлектриков при нескольких слоях может достигать значений порядка 300 кВ/мм [1, 8].

Использование диэлектрика малой толщины при высоких значениях рабочих напряженностей электрического поля, несмотря на небольшие значения диэлектрической проницаемости у органических материалов, позволяет получать на их основе относительно большие значения удельной емкости и удельной энергии конденсаторов. Кроме того, механизированный способ изготовления конденсаторных секций таких конденсаторов путем намотки их на специальных станках — полуавтоматах или автоматах облегчает возможность получения конденсаторов большой емкости, достигающих сотен микрофард.

Конденсаторная бумага и полярные синтетические пленки обладают довольно высокими потерями на переменном токе, поэтому изготавливаемые из них конденсаторы предназначаются в основном для работы при постоянном напряжении или переменном напряжении низкой частоты. Неполярные синтетические пленки имеют малые значения $\operatorname{tg} \delta$, поэтому частотный диапазон конденсаторов с таким диэлектриком значительно шире. Так как конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок имеют малый коэффициент абсорбции, то это делает их незаменимыми при использовании во времязадающих

цепях, счетно-решающей и измерительной технике и т. д.

В бумажных конденсаторах, обкладки которых изготовляются из металлической фольги, обычно алюминиевой, соединение выводов с обкладками производится при помощи вкладных контактов. При безындукционной намотке выводы припаивают к выступающей фольге. Так как от 13 до 40% от объема конденсаторной бумаги приходится на долю пор, заполненных воздухом и влагой, и, кроме того, бумага часто содержит проводящие включения, пронизывающие в отдельных местах ее насквозь, то для обеспечения необходимой электрической прочности конденсаторов в них применяют не менее двух слоев бумаги. Намотанные конденсаторные секции для удаления влаги тщательно сушат и пропитывают воскообразными веществами, минеральными маслами или синтетическими жидкостями, а затем помещают в защитные корпуса. По способу защиты от влаги конденсаторы подразделяются на герметизированные и уплотненные.

По величине номинального напряжения бумажные конденсаторы подразделяются на низковольтные (K40) с номинальным напряжением до 1,6 кВ и на высоковольтные (K41) — на 2 кВ и выше. В табл. 2-1 приведены электрические и механические характеристики основных типов бумажных и металlobумажных конденсаторов. Из таблицы видно, что для бумажных конденсаторов характерны широкие интервалы емкостей, номинальных напряжений и рабочих температур. Большое значение $\operatorname{tg} \delta$ бумажных конденсаторов ограничивает их применение на повышенных частотах. Бумажные конденсаторы могут использоваться при постоянном, переменном и пульсирующем напряжениях, а также в импульсных режимах. Они применяются в качестве шунтирующих, фильтровых, разделительных, помехоподавляющих, накопителей энергии и пр. В последнее время их применяют также и в качестве контурных — в звуковом диапазоне частот, когда требования к добротности контура невысоки. В связи с повышенной абсорбцией электрических зарядов бумажные конденсаторы не рекомендуется использовать в цепях, где быстрое протекание процессов заряда и разряда конденсаторов является обязательным требованием.

У металlobумажных конденсаторов в отличие от бумажных конденсаторов с фольговыми обкладками роль

Таблица 2-Б

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
						вибрация		удары	число ударов, не более	линейное уско- рение, м/с², не более	
	минимальная, пФ	максималь- ная, мкФ		частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, м/с², не более					
							минимальная	максимальная			
КБГ-И КБГ-М	1 000 1 500 470	0,25 0,25 0,15	200 400	-60 +70	5-200	58,6			157	5,0	
	3900 470	0,22 0,018	400 600	-60 +70	5-80	98,1			—	5,0	
КЗ	2, 2·10 ⁵ 10 ⁵	1,0 1,0 (2×0,47)	250 500	-60 +70	10-200	58,6			147	5,0	
	10 ⁵ 10 ⁵	0,47 0,22	1000 1600				39,2				
К40П-2	1000	0,047	400	-60 +85	10-600	98,1		245	5000	5,0	
К40П-3 (КБ)	10000 4700 4700	0,47 0,33 0,22	200 400 600	-40 +60	10-80	24,4		117,8	—	1,0	

Продолжение табл. 2-1

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
						вибрация		удары	число ударов, не более	линейное уско- рение, м/с², не более	
	минимальная, пФ	максималь- ная, мкФ		частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, м/с², не более	9				
	минимальная, пФ	максималь- ная, мкФ						минималь- ная	максималь- ная		
К40У-9	470	1,0	200	—60	+125	10—1000	73,5	342	10 000	491	10,0 (до 85°С) 5,0 (85—125°С)
	4700	0,68	400								
	470	0,47	630								
	1000	0,22									
К41-1	10⁴	20,0	2500	—60	+125	5—600	73,5	1471	9	245	0,25—15,0 (в зависимости от напряжения и температуры)
	10⁴	20,0	4000								
	10⁴	10,0	6300								
	10⁴	6,0	10 000								
К41-8	10⁴	2,0	16 000								
	10⁴	0,47	25 000								
	10⁴	0,1	40 000								
	—	0,03	50 000	+5	+40	5—80	24,4	—	—	88,5	1,0
МБГ	2,5·10⁵	25,0	200	—60	+70	5—75	98,1	—	—	147	6,0
	(2×2,5·10⁵)	10,0	400								
	10⁵ (2×10⁵)	4,0	600								
	2,5·10⁴	2,0	1000								
	2,5·10⁵	10,0	1500								

Продолжение табл. 2-1

Тип конденсатора	Диапазон номинальных емкостей		Номинальное напряжение, В	Интервал рабочих температур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговечность, тыс. ч
						вибрация		удары	число ударов, не более	линейное ускорение, м/с², не более
	минимальная, пФ	максимальная, мкФ		минимальная	максимальная	частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, м/с², не более		
МБГВ	10 ³	160 200	500 1000	-60	+60	5-200	39,2	117,8 58,6	10 000 5000	1,0 0,5
	10 ³	27,0	200	-60	+70	—	58,6— 147	49	—	342 1,2
МБГО	2·10 ³	30,0	160							
	10 ³ 10 ³ 5·10 ³ 2,5·10 ³	30,0 30,0 20,0 20,0 10,0	300 300 400 500 600	-60	+60	25-75	98,1	—	—	2,0
МБГТ	10 ³	20,0	160							4,0 (до 85°C)
	5·10 ³ 2,5·10 ³ 10 ³ 10 ³	10,0 10,0 10,0 10,0	300 500 750 1000	-60	+100	—	98,1	—	—	157 1,5 (85—100°C)
МБГЧ	2,5·10 ³	10,0	250 (50 Гц)	—	—	5-80 (МБГЧ-1)	—	—	—	—
	— 2,5·10 ⁻³	1,0 4,0	280 (50 Гц) 500 (50 Гц)	-60	+70 (МБГЧ-1) +125 (МБГЧ-2)	5-600 (МБГЧ-2)	98,1	245	5000	245 2,0 (до 70°C)

Продолжение табл. 2-1

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал раб- очих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговечность, тыс.ч	
						вибрация		удары	число ударов, не более		линейное уско- рение, м/с², не более
	минимальная, пФ	максималь- ная, мкФ		частота, Гц	ускорение, м/с², не более						
							минималь- ная	максималь- ная			
МБГЧ	2,5·10 ⁵	2,0	750 (50 Гц)								
	2,5·10 ⁵	1,0	1000 (50 Гц)								
МБМ	50 000	1,0	250								
	25 000	0,5	500								
	10 000	0,25	750								
	10 000	0,1	1000	-60	+70	—	147	147	—	342	5,0
	5100	0,1	1500								
МБМЦ	2,5·10 ⁵	1,0	200	-60	+70	—	98,1	—	—	—	2,0
	10 ⁵	1,0	400								
К42У-2	47 000	1,0	100								
	47 000	1,0	250								
	33 000	0,47	400								
	15 000	0,22	630	-60	+100	5—2500	196	1471	8	491	5,0 (до 70°С)
	10 000	0,22	1000								
К42Ч-6	4700	0,1	1600								
	10 000	6,8	100 (50 Гц)								
	10·10 ⁶	33	300 (50 Гц)	0	+35	5—80	24,4	117,8	5000	—	20,0
К42-11	3,3·10 ⁶	10	125	-60	+70	5—80	24,4	117,8	5000	—	5,0

обкладок выполняет тонкий слой металла, толщиной менее 0,1 мкм, нанесенный непосредственно на диэлектрик — бумагу. В этих конденсаторах воздушные зазоры между бумагой и обкладками, существующие в обычных бумажных фольговых конденсаторах, полностью исключаются. Металлизированные обкладки придают конденсатору свойство самовосстановления изоляции. Процесс самовосстановления состоит в том, что при коротком замыкании обкладок конденсатора ток короткого замыкания оплавляет и испаряет металл обкладок вокруг дефектного участка в диэлектрике. В результате этого последний изолируется от обкладок и электрическая прочность восстанавливается. Процесс самовосстановления длится примерно 10^{-5} — 10^{-6} с. Свойство самовосстановления позволяет поднять рабочее напряжение конденсаторов и обеспечивает возможность создания однослойных металлобумажных конденсаторов, которые по удельным объемам могут значительно превосходить бумажные конденсаторы с фольговыми обкладками. Это преимущество особенно заметно при низких номинальных напряжениях (<250 В), когда уменьшение объема может достигать 75% [9].

Постоянная времени металлобумажных конденсаторов при 25°C составляет от 250 до 2000 МОм·мкФ, т. е. обычно в 6—10 раз меньше, чем у обычных фольговых. Особенно низко значение и стабильность сопротивления изоляции у однослойных металлобумажных конденсаторов с цинковыми обкладками, например МБГО, МБМ, К42У-2 с $U_{\text{ном}} \leq 250$ В. Такие конденсаторы не рекомендуется применять при рабочих напряжениях менее 10 В, так как в этих случаях не обеспечивается самовосстановление слабых мест изоляции.

Металлобумажные конденсаторы могут использоваться в тех же узлах электрической схемы, что и бумажные с фольговыми обкладками, однако при этом необходимо учитывать нестабильность их сопротивления изоляции из-за явления самовосстановления. Подобно бумажным металлобумажные конденсаторы имеют повышенный коэффициент абсорбции электрических зарядов. При применении их для работы в импульсных режимах следует учитывать, что тонкая металлизированная обкладка может разрушаться под воздействием больших импульсных токов, величина которых регламентируется согласно данным, приведенным в § 3-4.

В процессе производства металлобумажные конденсаторы проходят электрическую тренировку, при которой изолируются проводящие включения или слабые места диэлектрика путем разрушения обкладок вокруг дефектного участка и повышается сопротивление изоляции. Восстановление электрической прочности, однако, не дает возможности применять металлобумажные конденсаторы при напряжениях, превышающих номинальное. С ростом напряжения увеличивается число частичных пробоев, что приводит при самовосстановлении к удалению части обкладок и снижению емкости. Особенно опасно удаление обкладок вблизи выводных контактов из-за возможности полной потери емкости. Таким образом, в отличие от конденсаторов других типов для металлобумажных низковольтных конденсаторов основным видом отказа при пробое диэлектрика является не замыкание обкладок (отказ вида КЗ), а потеря емкости (отказ вида «обрыв»). Такого же типа отказы могут возникать и при использовании металлобумажных конденсаторов в импульсных режимах при больших разрядных токах. Пониженные по сравнению с бумажными значения сопротивления изоляции однослойных металлобумажных конденсаторов, а также возможные при эксплуатации единичные случаи пробоя с последующим самовосстановлением ограничивают их применение, в основном, цепями развязок, блокировок и фильтров (МБГ, МБГО, МБГН, МБГТ, МБМЦ) при постоянном и пульсирующем напряжениях. Если применять металлобумажные конденсаторы в счетных устройствах, то при самовосстановлении конденсатора может произойти ложное срабатывание схемы. Однако некоторые металлобумажные конденсаторы, например типа К42У-2, МБГВ, К42-11 и т. д., могут применяться также при переменном напряжении и в импульсном режиме.

Конденсаторы с диэлектриком из синтетических пленок разделяются на следующие основные группы: а) конденсаторы из неполярных пленок; б) конденсаторы из слабополярных пленок; в) конденсаторы из полярных пленок; г) комбинированные конденсаторы (пленка и бумага); д) лакопленочные конденсаторы.

По конструкции и технологии изготовления пленочные конденсаторы существенно не отличаются от бумажных и металлобумажных. Однако пленочные конденсаторы с металлизированными обкладками по сравне-

нию с металлобумажными могут выдерживать меньшее число пробоев, при которых сохраняется эффект «самовосстановления». Основным преимуществом конденсаторов из неполярных пленок являются малые потери (на порядок ниже, чем у бумажных), высокие значения сопротивления изоляции и низкая абсорбция. Постоянная времени при комнатной температуре для этих конденсаторов превышает 10^4 — 10^6 МОм·мкФ и мало зависит от температуры. Коэффициент абсорбции полистирольных и фторопластовых конденсаторов обычно находится в пределах 0,01—0,1%, что позволяет применять их в цепях с большой постоянной времени и в цепях точной выдержки времени. Высокое значение постоянной времени обуславливает применение полистирольных и фторопластовых конденсаторов в электрических дозиметрах, основанных на конденсаторном принципе, и в измерительной технике.

Области применения фторопластовых и полистирольных конденсаторов существенно не различаются, но фторопластовые конденсаторы могут применяться при повышенных температурах и более жестких требованиях к электрическим параметрам.

Основными представителями полистирольных конденсаторов являются: малогабаритные конденсаторы ПМ, открытые ПО и ПСО, выпускаемые в прямоугольных корпусах К70-7 и открытые высоковольтные конденсаторы ПОВ. Открытые полистирольные конденсаторы могут применяться при относительной влажности, не превышающей 80%. Для эксплуатации при повышенных температурах (до 200°C) предназначены фторопластовые термостойкие конденсаторы ФТ и К72П-6. Следует иметь в виду, что долговечность этих конденсаторов при температурах от 100 до 200°C снижается. Для работы в цепях переменного тока высокой частоты предназначены фторопластовые частотные конденсаторы ФЧ и К72-6, К72-11. Конденсаторы К72-6 могут применяться и в импульсном режиме.

Высоковольтные фторопластовые герметизированные термостойкие конденсаторы в изолированном корпусе типа ФГТ-И могут эксплуатироваться как в цепях постоянного и переменного токов, так и в режиме однополярных импульсов с частотой следования не более 1000 Гц, длительностью от 2 до 50 мкс при максимальном токе в импульсе 40 А.

К металлопленочным (полистирольным) конденсаторам относятся: однослойные МПО, герметизированные в цилиндрическом корпусе МПГ-Ц, К71-3, К71-4, К71-5, герметизированные в прямоугольном корпусе МПГ-П.

Для уменьшения габаритов пленочных конденсаторов применяется пленка из полиэтилентерефталата с $\epsilon=3,3$. Полиэтилентерефталатные конденсаторы имеют потери такого же порядка, как и бумажные конденсаторы, но большее значение сопротивления изоляции и меньшую абсорбцию. Эти конденсаторы используются в тех же целях, что и бумажные при повышенных требованиях к сопротивлению изоляции и абсорбции. Полиэтилентерефталатные конденсаторы выпускаются с фольговыми (К74-5, К74-8) или металлизированными (ПМГП, К73-П-2, К73П-4) обкладками. Хотя конденсаторы К74-5 имеют номинальное напряжение 50 В, они могут эксплуатироваться и при напряжениях до 100 В, но при этом их долговечность сокращается с 5000 ч до 1000 ч. В последнее время находят применение конденсаторы из поликарбонатных пленок с диэлектрической проницаемостью 2,2—2,5 и $\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-3}$ (К77-1, К77-2, К77-3, К77-5).

Применение в конденсаторах комбинированного диэлектрика позволяет повысить электрическую прочность и сопротивление изоляции, а также уменьшить потери по сравнению с бумажными конденсаторами. Так как объемное сопротивление изоляции пленки выше, чем у конденсаторной бумаги, более чем в 10 раз, то большая часть постоянного напряжения падает на пленку, а бумага при этом электрически нагружается мало и служит для всасывания пропиточной массы в зазоры между пленками. Область применения комбинированных конденсаторов аналогична бумажным при повышенных требованиях к электрической прочности и надежности.

Основными типами низковольтных комбинированных конденсаторов являются: К75-24, К75-10, К75-12, К75П-4. Последние предназначены для устранения помех радиоприему промышленного происхождения в месте их возникновения (электрические машины, силовые распределительные щиты станций и подстанций и т. п.).

Высоковольтные комбинированные конденсаторы выпускаются как для применения в цепях постоянного и пульсирующего тока (ПКГТ, К75-15), так и в импульсных режимах (ПКГИ, К75-25, К75-9, К75-14, К75И-7).

Некоторые характеристики основных типов пленочных, металлопленочных и комбинированных конденсаторов

Тип конденсатора	Диапазон номинальных емкостей		Номинальное напряжение, В	Интервал рабочих температур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
						вибрация		удары			
	минимальная, пФ	максимальная, мкФ		частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, не более	число ударов, не более	линейное ускорение, м/с², не более			
ММПО	100	0,01	60	-60	+70	5—80	98,1	342	4000	491	3,0
	51	0,03	300	-40	+50	—	49,1	—	—	—	1,0
	—	390	10 000	0	+60	5—80	98,1	342	4000	491	5,0
ПОВ	—	390	15 000	0	+60	—	—	—	—	—	—
	—	120	18 000	0	+60	—	49,1	—	—	—	—
	470	0,01	500	-60	+60	5—80	73,5	—	—	—	3,0
ПСО К70-7	10 000	0,5	100	-60	+60	—	—	—	—	—	—
	1000	0,134	250	—	+60	—	—	—	—	—	—
	150	0,175	350	—	+60	—	—	—	—	—	—
МПО	250 000	0,5	250	-60	+60	5—600	98,1	—	—	88,5	2,0
	3000	0,25	400	—	+60	—	—	—	—	—	—
	1000	0,1	600	-60	+60	5—600	98,1	—	—	88,5	3,0
МПП-Ц	3000	0,02	500	-60	+60	—	—	—	—	—	—
	3000	0,01	1000	—	+60	—	—	—	—	—	—
	200 000	2	250	-60	+60	5—80	98,1	—	—	88,5	10,0
МПП-П	25 000	0,1	500	—	+60	—	—	—	—	—	—
	15 000	0,05	1000	—	+60	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 2-2

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал ра- бочих темпе- ратур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговечность, тыс. ч	
						вибрация		удары			
	минималь- ная, пФ	максималь- ная, мкФ		частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, не более	число уда- ров, не более	линейное ускорение, м/с², не более			
МПГО	4 мкФ	10	160	-60	+60	5-80	98,1	—	—	88,5	3,0
	200 000	2	250								
	500 000	1	400								
		0,1	600								
ФТ	560	0,47	200 (до 10 кГц)	-60	+200	5-1000	98,1	342	10 000	491	0,5
	560	0,22									
	100 000	1,0	60 (до 5000 Гц)								
	250 000	1,0	125 (до 5000 Гц)	-60	+155	10-2000	98,1	147	1000	—	0,5-1,0
ФЧ	100 000	1,0	200 (до 5000 Гц)								
	200 000	1,0	500 (до 2400 Гц)	-50	+60	10-70	49,1	78,5	—	—	5,0
	470	1,0	200								
	470	0,47	500								
К72П-6	470	0,47	1000	-60	+200	5-600	73,5	736	4000	1470	1,0-7,0
	470	0,47	1600								
	470	0,056	2000—	-60	+155	5-600	73,5	117,8	5000	245	5,0
	470	0,1	25 000								
ФГТ-И											

Продолжение табл. 2-2

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговечность, тыс. ч	
	минималь- ная, пФ	максималь- ная, мкФ		вибрация		удары		линейное ускорение, м/с², не более			
				частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, не более	число ударов, не более				
ПМГП К73П-2	5 мкФ	15	100	-60	+85	5—200	98,1	342	3000	735	1,0
	2200	0,68	400	-60	+125	10—2000	73,5	342	10 000	981	0,25—10,0
	10 0	0,47	430	-60	+70	5—1000	73,5	742	4000	491	5,0
К73П-4 К74-5	4700	0,33	1000	-60	+70	10—80	24,5	117,8	—	—	5,0
	1 мкФ	10,0	250	-20	+85	5—200	39,2	147	—	—	5,0
	1000	0,22	50	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С) 0,5 (70— 100°С)
К74-8	100 000	1,0	50	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
	1000	0,68	100	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
	1000	0,47	200	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
ПКГТ	1000	0,33	400	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
	1000	0,22	630	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
	10 000	2,0	3000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
ПКГИ	1000	2,0	5000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
	10 000	0,5	10 000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70—85°С) 1,0 (85— 100°С)
	10 000	0,25	15 000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
ПКГИ	10 000	0,1	20 000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
	10 000	2,0	1000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
	2200	1,0	3000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70°С)
ПКГИ	1000	0,05	5000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70—85°С) 1,0 (85— 100°С)
	2000	0,025	10 000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70—85°С) 1,0 (85— 100°С)
	2000	0,025	16 000	-60	+100	5—600	98,1	147	2000	981	5,0 (до 70—85°С) 1,0 (85— 100°С)

Продолжение табл. 2-2

Тип конденса- тора	Диапазон номиналь- ных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговечность, тыс. ч	
	минималь- ная, пФ	максималь- ная, мкФ		вибрация		удары		линейное ускорение, м/с², не более			
				частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, не более	число уда- ров, не более				
ПКГИ	3000	0,025	25 000	—60	+100	10—1000	73,5	342	10 000	245	5,0(до 70°С) 3,0(70— 85°С) 2,0(85— 100°С)
	3000	0,0051	40 000								
	10 000	0,025	50 000								
	47 000	1,0	250								
	22 000	1,0	500								
K75П-4	47 000	0,47	750	—60	+100	5—100	117,8	342	10 000	981	5,0(до 85°С)
	22 000	0,22	1000								
	100 000	10,0	250								
	100 000	3,3	500								
	100 000	1,5	750								
K75-10	100 000	1,0	1000	—60	+100	5—3000	147	342	10 000	2943	10,0 при T = 85°С
	220 000	22	63								
	100 000	3,9	100								
	22	3,9	200								
	0,001	1,0	400								
K77-1				—60	+125	5—3000	147	342	10 000	2943	2,0 при T = 125°С

Продолжение табл. 2-2

Тип конденса- тора	Диапазон номиналь- ных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	миним.- ная, пФ	максималь- ная, мкФ		вибрация		удары					
				минималь- ная	максималь- ная	частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, не более	число ударов, не более	линейное ускорение, м/с², не более	
K71-3	4·10 ⁶	10	160	-60	+100	5—3000	147	342	10 000	2943	2,0
	270 000	2	250								
	82 000	0,22	400								
	1000	0,047	630								
K71-4	1,2·10 ⁶	10	160	-60	+85	5—3000	147	342	10 000	2943	10,0
	1000	1	250								
	12 100	0,2	200								
	612	0,012	250								
K71-6	5,1	0,000604	300	-60	+70	5—3000	147	342	10 000	981	10,0
	10 000	1,0	160	-60	+85	5—3000	147	342	10 000	4905	10,0
	1000	0,47	100								
	2700	0,33	200	-60	+100	5—80	98,1	147	10 000	491	10,0
K73-9	1000	0,15	400								
	470	0,1	630	-60	+85	5—80	39,2	147	10 000	—	10,0
	2×0,01× ×10 ⁶	—	50	-60	+125	5—200	98,1	342	10 000	981	10,0
	2,7·10 ⁶	6,8	160								
K73-11	47 000	2,2	250								
	22 000	1,0	400								
	1000	0,47	630	-60	+125	5—200	98,1	342	10 000	981	10,0

Продолжение табл. 2-2

продолжение табл. 22

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минималь- ная, пФ	максималь- ная, мкФ		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары			
						частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, не более	число ударов, не более	линейное ускорение, м/с², не более	
К74-7	150	390 пФ	16 000	-60	+70	5—3000	147	735	4000	491	2,0
	1,5·10³ 470 000 10 000	2,2 1,0 0,33	200 300 500	-60	+200	5—3000	147	1471	4000	1471	3,0
К72-11	1,0·10³ 470 000 220 000 100 000 47 000	4,7 3,3 1,0 0,47 0,22	125 250 500 750 1000	-60	+70	5—80	39,2	342	10 000	147	3,0
	3300 1000	10,0 8,0	400 630								
К75-12	2200 10 000	6,0 4,0	1000 1600	-60	+100	5—2500	176,4	1470	10 000	981	1,0 (85— 100°C) 10,0 (до 85°C)
	100 000 51 000 51 000 24 000 10 000 5100	10,0 4,0 1,0 0,5 0,1 0,024	3000 5000 10 000 16 000 25 000 40 000 50 000	-	-	5—1000*	73,5*	342* 1471	10 000 9 10 000	491* 245	5,0 (до 70°C) 2,0 (70—85°C) 1,0 (85— 100°C)

* Для конденсаторов на номинальные напряжения 3; 5; 10; 16 кВ (до 2 кг).

** Для конденсаторов на номинальные напряжения 3; 5; 10; 16 кВ (более 2 кг); 25; 40; 50 кВ.

Комбинированные герметизированные импульсные конденсаторы ПКГИ с фольговыми обкладками в зависимости от номинального напряжения и номинальной емкости могут эксплуатироваться при максимальной частоте следования импульсов от 400 до 10 000 Гц с длительностью от 0,25 до 200 мкс при максимальном токе в импульсе 100—500 А. Для повышения рабочего напряжения за счет самовосстановления в конденсаторах К75-14 и К75И-7 применена металлизированная бумага. Однако при этом ухудшаются тепловые характеристики конденсатора, что приводит к необходимости ограничения частоты следования импульсов (1 Гц для К75-14, 15 Гц для К75И-7) и максимальной рабочей температуры (40—50°C). В табл. 2-2 приведены некоторые характеристики основных типов пленочных, металлопленочных и комбинированных конденсаторов.

Наибольшей удельной емкостью среди конденсаторов с органическим диэлектриком обладают лакопленочные конденсаторы с очень тонкими металлизированными поллярными пленками. Эти конденсаторы по удельной емкости приближаются к электролитическим, но по сравнению с ними имеют значительно лучшие электрические характеристики и допускают эксплуатацию при знакопеременном напряжении.

Конденсаторы К76П-1 получают нанесением на подложку лака на основе триацетата, после чего производятся металлизация пленки, разрезка ленты, удаление подложки и намотка конденсаторов. Указанные конденсаторы выпускаются на номинальное напряжение 50 В с номинальными емкостями от 0,47 до 22 мкФ и могут эксплуатироваться при температуре от —60 до +70°C, при относительной влажности до 98%, воздействии вибрации в диапазоне частоты от 5 до 2000 Гц, с ускорением 98,1 м/с², ударах с ускорением до 342 м/с², при общем числе ударов 10 000, линейных нагрузках с ускорением до 491 м/с². Долговечность конденсаторов 5000 ч. Недостатком конденсаторов К76П-1 является неустойчивость постоянной времени, связанная с дефектами изоляции в местах удаления обкладки при тренировке напряжением. Такие дефекты возникают за счет проникновения металла в тонкие поры пленки при металлизации конденсаторов. Неустойчивость постоянной времени резко ослаблено у конденсаторов К76-2 на номинальное напряжение 100 В, допускающих эксплуатацию при темпе-

ратурах до 85°C (остальные характеристики конденсаторов К76-2 и К76-1 почти полностью совпадают).

При изготовлении конденсаторов К76-2 производится двухслойная лакировка комбинацией ацетилцеллюлозного и этилцеллюлозного лаков с междуслойной металлизацией, что позволяет ослабить влияние дефектов каждого из слоев лака.

2-2. КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ НЕОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Неорганические диэлектрики — керамические, стеклянные, стеклоэмалевые, стеклокерамические и слюдяные — характеризуются большой нагревостойкостью, механической твердостью, высокой химической стабильностью, повышенными значениями диэлектрической проницаемости. По конструктивному исполнению конденсаторы подразделяются: 1) на незащищенные, допускающие эксплуатацию в условиях повышенной влажности в составе аппаратуры, предусматривающей защиту конденсаторов от воздействия влажности; 2) защищенные, допускающие эксплуатацию в составе аппаратуры в условиях повышенной влажности; 3) неизолированные, т. е. конденсаторы с влагозащитным покрытием, не допускающие касания своим корпусом шасси или токоведущих частей аппаратуры, и 4) изолированные конденсаторы с изоляционным покрытием, допускающие касание корпусом шасси или токоведущих частей аппаратуры.

По своему назначению конденсаторы подразделяются на три типа:

тип 1 — конденсатор, предназначенный для использования в резонансных контурах или других цепях, где малые потери и высокая стабильность емкости имеют существенное значение;

тип 2 — конденсатор, предназначенный для использования в цепях фильтров, блокировки и развязки или других цепях, где малые потери и высокая стабильность емкости не имеют существенного значения;

тип 3 — керамический конденсатор с барьерным слоем, предназначенный для работы в тех же цепях, что и конденсатор типа 2, но имеющий несколько меньшее значение сопротивления изоляции.

Слюдяные и стеклоэмалевые (стеклянные) конденсаторы относятся к конденсаторам типа 1, стеклокерамические могут быть как типа 1, так и типа 2.

Наиболее широкое распространение в последние годы среди конденсаторов с неорганическими диэлектриками получили керамические конденсаторы. Составы керамических диэлектриков весьма сложны и разнообразны и обеспечивают большой набор значений диэлектрической проницаемости (от шести до десятков тысяч) и ТКЕ (от $+120 \cdot 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ до $3300 \cdot 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$). Керамические конденсаторы подразделяются на высокочастотные (тип 1) и низкочастотные (типы 2 и 3), высоковольтные (1600 В и выше) и низковольтные (до 1600 В). Основными особенностями керамических конденсаторов типа 1 являются нормированные значения ТКЕ (см. табл. 1-6), малые потери (табл. 1-9), малые значения индуктивности (см. табл. 1-11).

Конденсаторы типов 2 и 3 за счет большой диэлектрической проницаемости имеют значительную удельную емкость, но, вместе с тем, и сравнительно большие значения $\text{tg } \delta$: до 0,035 для типа 2 и до 0,1 для типа 3.

Особенностями конденсаторов типов 2 и 3 являются резкая зависимость емкости от температуры (рис. 1-6), а для некоторых типов конденсаторов — зависимость емкости от величины приложенного напряжения и наличие диэлектрического гистерезиса.

Керамические конденсаторы состоят из поликристаллического керамического диэлектрика, электродов, нанесенных путем вжигания металлов, в основном благородных, — серебра, платины или палладия, припаянных выводов и защитного покрытия.

Первые низковольтные керамические конденсаторы выпускались только трубчатой (КТ) и дисковой (КД) конструкций и имели относительно невысокие значения удельной и номинальной емкости. При дальнейшей модернизации этих конденсаторов были применены новые керамические материалы с более высокими значениями диэлектрической проницаемости, использованы более совершенные технологические приемы при их изготовлении и новые материалы для защиты от воздействия внешней среды. Это позволило расширить максимальные значения номинальных емкостей (до 10 000 пФ для КТ-1, 6800 пФ для КТ-2, 2200 пФ для КД-1 и 15 000 пФ для КД-2), улучшить электрические и эксплуатационные характеристики конденсаторов. Конденсаторы КТ и КД, выпускаемые промышленностью в массовых количествах, отличаются малой стоимостью и широко применяются

в радиоэлектронной аппаратуре. Основные характеристики этих и других низковольтных керамических конденсаторов приведены в табл. 2-3.

Необходимость увеличения удельных и номинальных емкостей и расширение условий применения привели к созданию керамических конденсаторов, которые по конструкции и технологии изготовления существенно отличаются от традиционных конденсаторов КТ и КД. К ним, в частности, следует отнести конденсаторы, оформляемые горячим литьем под давлением, из которых следует выделить секционные керамические конденсаторы КЛГ и КЛС [10]. Конструкция диэлектрика этих конденсаторов показана на рис. 2-1, 2-2. Как видно, диэлектрик представляет собой прямоугольную призму из керамического материала, узкие прямоугольные прорезы в котором образуют ряд тонких керамических пластин, на поверхности которых нанесен тонкий слой серебра (до 15 мкм). Электроды, нанесенные на поверхности отдельных пластин, соединяются с наружными электродами, находящимися на противоположных гранях корпуса. Таким образом, общая емкость конденсатора складывается из параллельно соединенных емкостей отдельных пластин. У конденсатора КЛГ (рис. 2-1) прорезы глухие, а величина межэлектродного зазора равняется высоте боковой грани призмы.

Однако технологические сложности и, особенно, трудности регулировки емкости у конденсаторов КЛГ ограничивают объемы их выпуска. Более простой является технология конденсаторов КЛС со сквозными щелями, которые позволяют регулировать емкость шлифовкой пластин по высоте. Основным недостатком конденсаторов КЛС является то, что межэлектродный зазор этих конденсаторов образуется только по торцу пластин и составляет 0,24—0,45 мм. Малый межэлектродный зазор приводит к уменьшению влагостойкости кон-

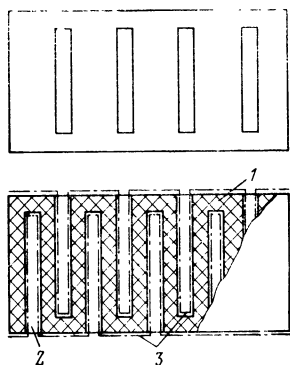


Рис. 2-1. Конструкция корпуса конденсатора КЛГ.

1 — керамика; 2 — щели; 3 — электроды.

Некоторые характеристики основных типов низковольтных керами

Тип конденсатора	Группа по температурной стабильности	Диапазон номинальных емкостей, пФ		Номинальное напряжение, В
		минимальная	максимальная	
КТ-1	H70	680	10 000	160
	Π100, Π33, M47, M75, M700, M1300	1	560	250
	Π100, Π33, M47, M75, M700, M1300	1	560	160
КТ-2	H70	680	6800	300
	Π100, Π33, M47, M75, M700, M1300	2,2	750	500
КТ-3	Π100, Π33, M47, M700	2,2	430	500 750
КД-1	Π100, Π33, M75, M700, M1300	1	130	100
	M47	1	10	160
	H30, H70	330	2200	160
	Π100, Π33, M47, M75, M700, M1300	1	130	250
	Π100, Π33, M75, M1300	1	270	500
КД-2	H70	470	6800	300
	Π100, Π33, M47, M75, M700, M1300	1	270	500
	Π100, Π33, M47, M700	1	47	500
КГК	Π120, Π33, M47, M700	5,1	560	500
КЛГ	M47	18	330	160
		18	270	250
	M75, M700, M1300	20	2000	160
	H30	2200	10000	160
		1000	4700	250
	H70	10000	33000	70
		4700	22000	160
	M75, M330, M750, M1500	0,47	10	250
КТΠ	Π120, M47, M700, M1300	8,2	330	500
	H70	2200	15000	400
КО	M1300	22	330	500
	H70	1000	4700	400
КДО	Π120, M47, M700, M1300	3,3	100	500
	H70	1500	2200	400

Таблица 2-3

ческих конденсаторов

Интервал рабочих температур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс.ч
минимальная	максимальная	вибрация		удары			
		частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, м/с², не более	число ударов, не более	линейное ускорение, м/с², не более	
—60	85	5—600	98,1	342	5000	981	5,0
	155						2,0
—60	85	5—200	98,1	342	10 000	981	5,0
	85,155						5,0 (до 85°С) 2,0 (85—150°С)
—60		5—80	98,1	117,8	5000	490	5,0
—60	155	5—1000	98,1	342	5000	981	1,5
	85						10,0
—60	155	5—200	98,1	342	10 000	981	3,0
	85	5—600					10,0
—60	85	5—600	98,1	735	1 000	981	10,0
—60	85	5—600	98,1	342	10 000	245	5,0
—60	155	5—1000	98,1	735	4000	981	10,0
	125						
—60	100						
—60	85						
—60	85	5—600	98,1	342	10 000	981	5,0
—60	85	10—300	7,5	342	10 000	215	10,0
—60	85	10—300	73,5	117,8	10 000	245	10,0
—60	85	10—600	73,5	117,8	10 000	245	10,0

Тип конденсатора	Группа по температурной стабильности	Диапазон номинальных емкостей, пФ		Номинальное напряжение, В
		минимальная	максимальная	
КТПМ-1	M1300 H70	— —	68 470	160
КТПМ-2	Π120, M47, M75, M700, M1300 H70	8,2 2200	560 4700	250 160
КОМ	Π120, M47, M75, M700, M1300 H70	8,2 3300	470 6800	250 160
K10-7A	M47, M76, M750, M1500, H30, H70 H70, H90 H90	6,8 1000 15 000	6800 22 000 33 000	250 160 100
K10-7B	M47, M75, M750, M1500, H30, H70, H90	22	47 000	25
K10У-2	M47, M75, M1500, H20, M750 H90	1,5 1500	1000 4700	400
K10-Π4	Π120, M47, M75, M700, M1300 H30, H70, H90	3,9 470	100 3300	350 350
КЛС-1	H70, H90 H30 M47, M75, M750, M1500, H50	4700 1500 30	100 00 10 000 10 000	35 50 70
КЛС-2	H30 M47, M75, M750, M1500, H50	1000 18	6800 3300	100 125
КЛС-3	H30 M47, M76, M750, M1500	680 8,2	3300 820	160 200
КМ	Π33, M47, M75, M750, M1500, H50, H90 H90	120 22 000	10 ⁶ 680 000	25 35
	Π33, M47, M75, M750, M1500, H50, H90 H30	120 1500	150 000 68 000	50 70
	Π33, M47, M75, M1500, H30	16	68 000	100
	То же	16	47 000	160
	" "	16	22 000	250
K10У-5	—	10 ⁶ 10 ⁴ 6800 6800 4700	2,2·10 ⁶ 4,7·10 ⁵ 3,3·10 ⁵ 1,5·10 ⁵ 68 000	3 10 25 50 100
K10-23	Π33, M47, M750, M1500, H30	2,2	33 000	16
K10-9	Π33, M47, M750, M1500, H30, H90	2,2	270 000	
K10-17	Π33, M47, M75, M750, M1500, H50, H90	2,2 470	12 000 330 000	25 25

Интервал рабочих температур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс.ч
минимальная	максимальная	вибрация		удары		линейное ускорение, м/с², не более	
		частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, м/с², не более	число ударов, не более		
—60	85	10—600	73,5	117,8	10 000	245	5,0
—60	85	10—200	73,5	117,8	10 000	245	5,0
—60	85	10—200	73,5	117,8	10 000	245	5,0
—25	70	5—80	24,5	117,8	10 000	—	5,0
—25	70	5—80	24,5	117,8	10 000	—	5,0
—60	125 85	10—80	24,5	117,8	10 000		5,0
—60 —60	125 85	5—600	98,1	117,8	10 000	490	10,0
—60	85 (от 0 до 1000 ч) 70 (от 100 до 1000 ч)	10—200	73,5	117,8	5000	490	10,0
—60	85 (в зависимости от группы температурной стабильности, варианта исполнения и приложенного напряжения — 125 и 155°С)	10—80	73,5	117,8	10 000	490	10,0 (из них 5,0 при 25°С)
—60	85	10—200	39,2	117,8	—	—	5,0
—60	85	5—5000	392	1470	4000	1470	10,0
—60	85	5—5000	392	1470	4000	1470	5,0
—60 —60	125 85 (Н90) 125 (Н50)	5—5000	392	1470	4000	1470	10,0

денсаторов КЛС: при нахождении конденсаторов в условиях относительной влажности свыше 80% влага, проникая сквозь изоляционно-защитное покрытие конденсатора, оседает на межэлектродном зазоре, частично поглощается диэлектриком и может вызвать снижение сопротивления изоляции до нескольких мегом и даже килоом. Особенно опасно одновременное воздействие на конденсаторы КЛС повышенной влажности и электри-

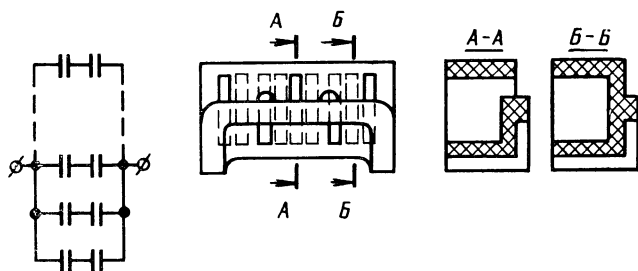


Рис. 2-2. Конструкция корпуса конденсатора КЛС с резервированием и схема соединения его пластин.

ческого напряжения, которые часто приводят к пробой. Поэтому конденсаторы КЛС можно эксплуатировать без дополнительной влагозащиты только при относительной влажности менее 80%. Однако для аппаратуры, не подвергающейся воздействию повышенной влажности, конденсаторы КЛС применяются весьма широко и имеют высокую надежность.

Как для конденсаторов КЛГ, так для КЛС пробой одной из пластин вызывает потерю работоспособности всего изделия. Для секционных керамических конденсаторов в последнее время предложено [11] «резервирование» пластин. Сущность этого приема состоит в том, что между двумя соседними пластинами оставляют свободную, не подключенную ни к одному из общих электродов прорезь, соединяющую последовательно (рис. 2-2). Таким образом, общая емкость складывается из емкости параллельно соединенных пар пластин с последовательным соединением между собой. Пробой одной из пластин вызывает небольшое изменение общей емкости конденсатора без потери его работоспособности. Этот способ позволяет повысить надежность конденсатора в 10—20 раз по сравнению с нерезервированным вариантом.

Однако при этом значение емкости при неизменных размерах конденсатора снижается примерно в 2—3 раза.

Повышенную надежность позволяет получить конструкция конденсаторов КТ-1Е, отличающаяся от традиционной конструкции трубчатых конденсаторов типа КТ наличием глухого дна и, следовательно, только одного наружного межэлектродного зазора, чистота которого может легко контролироваться [12] (рис. 2-3). Большинство отказов трубчатых конденсаторов старой конструкции вызывалось пробоем между электродами по внутреннему межэлектродному зазору, на котором могли располагаться проводящие включения.

Кроме того, более эффективное использование объема конденсатора позволило несколько увеличить толщину диэлектрика и расширить диапазон номинальных емкостей. Конденсаторы КТ-1Е отличаются высокой влагостойкостью и имеют номинальные емкости от 1 до 15 000 пФ. Они могут эксплуатироваться при температуре от -60 до $+155^{\circ}\text{C}$ при напряжении до 750 В, в диапазоне вибрации от 5 до 2500 Гц, с ускорением до 147 м/с^2 . Долговечность конденсаторов 10 000 ч.

Для применения в высокочастотных цепях, критичных к значениям собственной индуктивности, предназначены конденсаторы КДУ и К10У-2. Керамические дисковые ультракоротковолновые конденсаторы типа КДУ могут работать в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов ультракоротковолновой аппаратуры при частотах до 500 МГц. Ленточные короткие выводы, обладающие малой индуктивностью, обеспечивают значение резонансной частоты конденсатора не ниже 1000 МГц. Клиновидные конденсаторы К10У-2 являются безындукционными, безвыводными конденсаторами и предназначаются только для печатного монтажа. Серебряные электроды конденсатора одновременно являются выводами, предназначенными для монтажа конденсаторов в аппаратуру. Из-за малой стойкости керамических материалов к термоудару пайка конденсаторов К10У-2 должна производиться с подогревом таким образом, чтобы перепад между температурой конденсатора

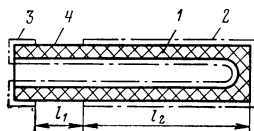


Рис. 2-3. Конструкция конденсатора КТ-1Е.

1 — керамика; 2, 3 — электроды; 4 — межэлектродный зазор.

и припоя не превышал 100°C. Толщина конденсаторов не превышает 1 мм. Широкое применение конденсатора К10У-2 получили в высокочастотных цепях телевизионной аппаратуры.

Для термокомпенсации в транзисторных селекторах телевизионных каналов дециметрового и метрового диапазонов предназначены малоемкостные керамические конденсаторы К10-29. Эти конденсаторы имеют низкие значения номинальных емкостей (от 0,47 до 10 пФ) при сравнительно больших нормированных отрицательных значениях ТКЕ (М75, М330, М750, М1500), правильный выбор которых позволяет компенсировать уход частоты транзисторных генераторов из-за изменения параметров полупроводниковых элементов при колебаниях температуры. Минимальное допустимое отклонение емкости от номинальной составляет $\pm 0,25$ пФ. Резонансная частота конденсаторов К10-29 находится в пределах 50—2000 МГц (в зависимости от емкости).

Большую удельную емкость имеют конденсаторы, изготавливаемые из тонких керамических пленок с органическим пластификатором. Наиболее простыми являются конденсаторы К10-7. Конденсаторы типа К10-7А представляют собой прямоугольные пластины с нанесенными по плоскости серебряными электродами и зазорами по краю. Стоимость конденсаторов не велика.

Конденсаторы типа К10-7В относятся к так называемой серии «беззазорных» конденсаторов, так как электроды у них располагаются по всей площади, а межэлектродный зазор образуется только по торцу пластины. Эта особенность позволяет полностью использовать объем керамического диэлектрика, но снижает величину рабочего напряжения. Выводы конденсаторов К10-7 однонаправленные, что очень удобно при их использовании на печатных платах. Для повышения механической прочности и влагостойкости конденсаторы покрываются защитным компаундом.

Максимальные значения номинальной и удельной емкости среди керамических конденсаторов типов 1 и 2 имеют монолитные конденсаторы. Конструктивно монолитный конденсатор представляет собой монолитный пакет из чередующихся очень тонких слоев металла и керамики. При изготовлении таких конденсаторов на сырые керамические пленки в определенном порядке наносят металлосодержащую пасту, после чего пленки

складывают в пакеты, спрессовывают, разрезают на заготовки и обжигают при температурах 1100—1450°C в зависимости от состава керамического материала. Так как при обжиге операции спекания керамического диэлектрика и вжигания электродов совмещаются, то в качестве электродов применяются только тугоплавкие металлы, не окисляющиеся при температуре обжига. При изготовлении монолитных конденсаторов используется в этих целях платина или палладий. Оба металла являются дефицитными и дорогостоящими, что повышает стоимость конденсаторов и ограничивает область их применения только ответственной аппаратурой, для которой в первую очередь имеют значение вес и размеры элементов.

В последнее время разработаны и начинают выпускаться промышленностью монолитные конденсаторы с электродами из благородных металлов (например, конденсаторы К10-20). Однако электрические параметры этих конденсаторов хуже, чем у обычных конденсаторов типов 1 и 2, а технология их изготовления сложна.

Наиболее распространенными среди монолитных конденсаторов являются конденсаторы КМ на номинальные напряжения от 25 до 250 В с максимальной номинальной емкостью 2,2 мкФ. Эти конденсаторы изготавливаются трех вариантов: *а* — с разнонаправленными выводами, неизолированные; *б* — с однонаправленными выводами, неизолированные и изолированные; *в* — незащищенные конденсаторы без проволочных выводов, с лужеными или нелужеными (серебряными) контактными поверхностями.

В среде, содержащей водород, могут эксплуатироваться конденсаторы КМ-С.

Эксплуатацию в сухом и влажном тропическом климате допускают изолированные монолитные конденсаторы К10-23 и К10-17 вариант *а* с однонаправленными выводами. Эти конденсаторы имеют опорные выступы, позволяющие создавать зазор около 1 мм между корпусом конденсатора и монтажной платой.

Указанные в табл. 2-3 механические нагрузки конденсаторы К10-23 и К10-17 выдерживают без повреждения при жестком креплении за корпус. При креплении за выводы на расстоянии 5—7 мм от корпуса конденсаторы могут эксплуатироваться при вибрации в диапазоне частот 5—200 Гц с ускорением до 98,1 м/с², линейном

ускорении до 981 м/с^2 и выдерживают 10 000 ударов с ускорением 342 м/с^2 . При креплении за выводы на расстоянии от 2 до 12 мм от корпуса собственные резонансные частоты конденсаторов К10-23 лежат в пределах от 800 до 200 Гц.

При облуживании выводов или пайке конденсаторов К10-23, К10-17 на расстоянии от 1,5 до 5 мм от корпуса следует учитывать, что перегрев может вызвать расплавление припоя в месте пайки выводов к монолиту внутри корпуса конденсатора и повреждение изоляционного покрытия конденсаторов. Поэтому при облуживании конденсаторов следует применять экран, располагаемый между расплавленным припоем и корпусом конденсаторов, а при пайке необходимо создавать дополнительный теплоотвод (например, фетром, смоченным спиртом, которыми охватывают корпус конденсатора).

Для применения в микросхемах, микромодулях, гибридных интегральных схемах и т. д. предназначены незащищенные безвыводные монолитные конденсаторы К10-9 и К10-17 вариант *в*. Эти конденсаторы имеют серебрённые или лужёные контактные площадки, посредством которых конденсаторы подключаются в аппаратуру. Контактные площадки имеют небольшие размеры. При механических нагрузках, приложенных к площадкам, может произойти полное или частичное отслоение контактов от конденсатора или от внутренних электродов монолита, что вызовет полную или частичную потерю емкости. Время пайки таких конденсаторов должно быть минимальным и не превышать 3 с для каждой контактной площадки. Для пайки рекомендуется применять припой ПОСК-50-18 ГОСТ 1499-70 с температурой плавления около 140°C и температурой пайки не более 220°C или ПСрОС-3-58 и другие оловяносвинцовые припои с содержанием серебра не менее 2% и температурой плавления $180\text{—}200^\circ\text{C}$ при температуре пайки не выше 260°C . Перед пайкой конденсаторы предварительно подогреваются до температуры $100\text{—}150^\circ\text{C}$ с целью исключения термоударов (особенно для конденсаторов групп Н30, Н70, Н90). Конденсаторы К10-9, К10-17 можно монтировать в схему с помощью проволочных проводников (при этом корпус конденсатора крепится к плате приклейкой, заливкой) или непосредственной припайкой к контактными площадкам платы. При использовании первого метода диаметр проволоки не должен превы-

шать 0,15 мм. Мощность паяльника не должна быть более 25 Вт, а его температуру следует контролировать. При использовании второго метода необходимо, чтобы коэффициенты линейного расширения конденсатора и платы были в максимальной степени согласованы, а плата должна быть жесткой и не коробиться в процессе сборки схемы и эксплуатации. Расстояние между контактными площадками конденсатора должно быть несколько меньше, чем расстояние между площадками конденсатора. Не допускается производить повторное облуживание луженых конденсаторов перед пайкой. Пайку рекомендуется производить методом окунания в расплавленный припой, поскольку этот метод обеспечивает наиболее высокое качество и надежность контактных соединений. Перед окунанием корпус конденсатора рекомендуется подклеить. Контактное соединение должно осуществляться не менее чем по 2/3 площади контактной площадки конденсатора. Правильность выбора платы и технологии пайки должна проверяться путем проведения соответствующих испытаний смонтированных узлов, особенно на термоциклы. В случае применения эпоксидных заливок или опрессовки конденсаторы должны защищаться буферными покрытиями, например компаундом КЛТ и др.

Среди керамических проходных и опорных конденсаторов наибольшее распространение получили трубчатые проходные (КТП) [13], опорные (КО) и дисковые опорные (КДО). Для крепления в аппаратуре эти конденсаторы имеют резьбовые втулки или гладкие втулки под пайку. Конденсаторы с резьбовыми втулками допускается устанавливать как непосредственно в отверстия панелей с резьбой, так и при помощи гаек, навинчиваемых на втулки конденсаторов. Закреплять конденсаторы рекомендуется при помощи торцового ключа, соблюдая осторожность, так как удары по керамическому корпусу конденсатора приводят к образованию трещин, которые могут вывести конденсатор из строя. Трещины могут появиться и в том случае, если крутящий момент, развиваемый ключом при установке конденсатора, будет превышать 49 Н·см (5 кгс·см). Конденсаторы со втулкой под пайку устанавливаются при помощи паяльника мощностью не более 50 Вт при продолжительности пайки не более 5 с. Если к выводам конденсаторов КТП, КО монтажные выводы припаиваются на расстоянии

менее 15 мм от керамического корпуса, то необходимо применять теплоотвод, устанавливаемый между керамическим корпусом конденсатора и местом пайки. Механические нагрузки на выводы проходных и опорных конденсаторов могут передаваться на керамику конденсатора, вызывая трещины. Поэтому не допускается использовать выводы конденсаторов КТП, КО, КДО в качестве опор для крепления других деталей.

Наименьшие габариты из проходных керамических конденсаторов имеют конденсаторы К10П4 (5×10 и

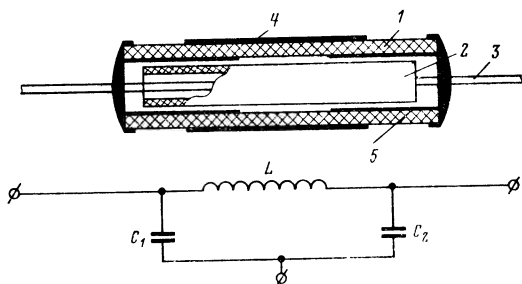


Рис. 2-4. Конструкция керамического фильтра.

1 — керамика; 2 — феррит; 3 — проходной вывод; 4 — наружные электроды; 5 — внутренний электрод.

3×8 мм), которые монтируются на панелях аппаратуры непосредственной пайкой электрода, расположенного на керамическом корпусе. Однако такой метод пайки требует особой осторожности из-за возможности легкого повреждения конденсатора.

Для подавления высокочастотных помех в цепях питания радиотехнических частот более эффективными, чем проходные конденсаторы, оказываются разработанные недавно проходные керамические фильтры Б7 и Б14. По внешнему виду фильтры Б7 напоминают проходные конденсаторы К10П4, а Б14 — КТП. Основным конструктивным отличием фильтров от указанных конденсаторов является то, что внутри керамической трубки на проходной вывод фильтра надевается ферритовый сердечник, а на керамической трубке создаются две емкости C_1 и C_2 (рис. 2-4). Таким образом получается П-образный фильтр, состоящий из индуктивности проходно-

го вывода L и емкостей C_1, C_2 . Такая конструкция позволяет получить большее затухание, чем у проходных конденсаторов (рис. 2-5). При монтаже фильтров Б7, Б14 необходимо выполнять рекомендации, которые были приведены выше для проходных и опорных конденсаторов.

Конденсаторы с барьерным слоем называются также конденсаторами из восстановленной керамики (конденсаторы типа 3). Конденсатор этого типа К10У-5 представляет собой диск из сегнетокерамического материала, который при обжиге в водородной среде восстанавливается до полупроводникового состояния. После восстановления диск окисляется путем прогрева в воздушной среде, причем на его поверхности образуется тонкий слой диэлектрика. На обе поверхности диска наносятся электроды, при этом общая емкость конденсатора образуется из последовательно соединенных емкостей тонких слоев, расположенных по обе стороны полупроводящего диска.

Последовательно включенный полупроводящий слой с относительно большим сопротивлением вызывает увеличение тангенса угла потерь (до 0,035—0,1 при 1 кГц), что ограничивает область применения конденсаторов низкими частотами. Ограничение в применении конденсаторов вызывают и малые значения сопротивления изоляции (постоянная времени от 0,005 до 35 МОм·мкФ).

Емкость конденсаторов с барьерным слоем зависит от приложенного постоянного напряжения. Так, например, для конденсаторов К10У-5 при изменении напряжения смещения постоянного тока от нуля до номинального напряжения емкость может уменьшаться на 25—50%.

Высоковольтные керамические конденсаторы по своему назначению делятся на высокочастотные и низкочастотные [14]. Одной из основных характеристик высокочастотных конденсаторов является допустимая реактивная мощность. Для ее увеличения при изготовлении

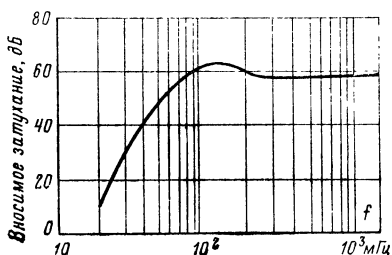


Рис. 2-5. Зависимость затухания фильтров Б-14 от частоты.

высокочастотных конденсаторов используется керамика с минимальными потерями, причем их арматура рассчитывается на возможность прохождения через нее больших токов, а конструкция конденсаторов выбирается, исходя из обеспечения наилучших условий охлаждения. Важным параметром низкочастотных керамических высоковольтных конденсаторов является удельная энергия. Поэтому для их изготовления используется керамика с высокой электрической прочностью и большой диэлектрической проницаемостью. К низкочастотным конденсаторам относятся и импульсные конденсаторы, предназначенные для работы в режиме видеоимпульсов. Однако импульсные конденсаторы должны иметь более высокие значения допустимой реактивной мощности, чем другие низкочастотные конденсаторы. К высокочастотным конденсаторам относятся К15У-1, К15У-2, К15У-3, к низкочастотным — К15-4, К15-5, К15И-6, КВИ.

По конструкции высоковольтные керамические конденсаторы разделяются на плоские (стержневые, бочечные, дисковые), трубчатые и горошковые. Плоские конденсаторы К15У-1 выпускаются на номинальные постоянные напряжения 4; 8; 12; 16 и 20 кВ (или 3; 3,5; 5; 6; 10; 12 и 14 кВ на высокой частоте), при номинальной реактивной мощности от 4 до 225 КВАр, со значениями номинальной емкости от 1 до 10 000 пФ. Выводы конденсаторов выполняются в виде плоских лент (вариант а) или с резьбовым креплением под винт (вариант б). Максимальная емкость (от 33 до 15 000 пФ) и номинальная реактивная мощность (от 2 до 400 КВАр) достигаются у трубчатых конденсаторов К15У-2, имеющих номинальные постоянные напряжения 4; 5; 6,3; 8; 12; 16; 20; 25 и 30 кВ (или 2; 3; 4; 6; 7; 8; 10; 15; 20 и 25 кВ на высокой частоте).

Горошковые конденсаторы К15У-3, выпускаемые на номинальные постоянные напряжения 4; 6,3; 8 кВ (или 3, 4, 5, 6 кВ на высокой частоте), имеют номинальные реактивные мощности от 10 до 30 КВАр и номинальные емкости от 2 до 3300 пФ. Конденсаторы К15У-1, 2, 3 могут эксплуатироваться при температуре от -60 до $+100$ или $+155^{\circ}\text{C}$, механических вибрациях 10—600 Гц (ускорение до $73,5 \text{ м/с}^2$), 10—200 Гц (ускорение 39,2 или $73,5 \text{ м/с}^2$). Долговечность конденсаторов 5000 ч. Применение принудительного охлаждения конденсаторов позволяет повысить их реактивную мощность.

Низкочастотные конденсаторы типа К15-4, разработанные взамен серии керамических высоковольтных конденсаторов типа КОБ, имеют стержневую или боченочную форму, аксиальные стержневые выводы и нанесенное способом пресс-литья органическое защитное покрытие. Эти конденсаторы предназначены для использования в фильтрах высоковольтных выпрямителей и как блокировочные. Конденсаторы К15-4 выпускаются на номинальные напряжения постоянного тока 12, 20, 30 и 40 кВ и имеют номинальные емкости от 220 до 4700 пФ.

Разработанные на базе керамических высоковольтных дисковых сегнетокерамических конденсаторов КВДС конденсаторы К15-5 имеют дисковую форму и выпускаются на сравнительно низкие номинальные напряжения постоянного тока (1,6; 3; 6,3 кВ) с номинальными емкостями в пределах 68—15 000 пФ. Отклонения емкости конденсаторов от номинальной лежат в пределах $+80\% \div -20\%$ (К15-4, К15-5), ± 10 , $\pm 20\%$ (К15-5). Оба типа конденсаторов имеют сравнительно большие значения тангенса угла диэлектрических потерь (0,02—0,035) и могут эксплуатироваться только при постоянном или пульсирующем напряжениях, обычно в аппаратуре массового применения в качестве фильтровых.

Для использования в накопительных и импульсных устройствах предназначены трубчатые конденсаторы К15И-6 с номинальными емкостями 0,015, 0,022 и 0,047 мкФ на номинальные напряжения 16, 10 и 6,3 кВ соответственно. Эти конденсаторы имеют высокое значение запасаемой энергии (до 1,9 Дж).

Для работы в импульсных режимах искусственных линий предназначаются керамические высоковольтные импульсные конденсаторы КВИ. Эти конденсаторы имеют диаметр от 5 до 50 мм, высоту от 16 до 43 мм, номинальные емкости от 2,2 до 4700 пФ при номинальном напряжении 5, 8, 10, 12, 16, 20 и 30 кВ. Конденсаторы выпускаются с допуском отклонения емкости от номинальной ± 10 и $\pm 20\%$. Конденсаторы КВИ могут эксплуатироваться в интервале температур от -60 до $+125^{\circ}\text{C}$ (КВИ-1) или до $+100^{\circ}\text{C}$ (КВИ-2, КВИ-3) при воздействии вибрации от 10 до 200 Гц с ускорением не более $78,5 \text{ м/с}^2$.

Как указывалось выше, максимальное значение емкости среди керамических конденсаторов 1-го и 2-го типов имеют монолитные конденсаторы. Однако из-за вы-

сокой температуры обжига этих конденсаторов (1200—1500°C) их электроды выполняются, как правило, из платины или палладия. Поэтому большой интерес представляют стеклянные, стеклоэмалевые и стеклокерамические монолитные конденсаторы, диэлектрики которых оформляются (обжигаются) при значительно меньших температурах (500—750°C), что сделало возможным использование для электродов менее дефицитных материалов — алюминия или серебра [15]. По своим характеристикам указанные конденсаторы близки к керамическим (табл. 2-4) и могут эксплуатироваться в цепях постоянного, переменного, пульсирующего напряжений, а также в импульсных режимах.

Отличительной чертой стеклянных конденсаторов является их высокая теплоустойчивость. Некоторые типы стеклянных конденсаторов могут эксплуатироваться при температурах до 200°C (K21Y-3) и до 300°C (K21Y-1). Конденсаторы K21Y-1 при напряжении, пониженном по отношению к номинальному (160 В), могут эксплуатироваться при температуре +350°C, а при снижении температуры до 200°C и ниже допускают эксплуатацию при двойном номинальном напряжении (500 В). Стеклянные конденсаторы имеют нормированные значения температурного коэффициента емкости. Для навесного монтажа выпускаются конденсаторы с проволочными выводами (вариант *а*), а для использования в заливке при некоторых вариантах печатного монтажа — без выводов (вариант *б* для K21Y-1, K21Y-3 и вариант *в* для K21-8). Высокая электрическая прочность стеклоэмали позволяет изготавливать конденсаторы малых размеров на высокое напряжение. Так, например, конденсатор ДС диаметром 30 мм и толщиной 12 мм имеет номинальное напряжение 5000 В.

Стеклокерамические конденсаторы СКМ выпускаются в двух вариантах исполнения: с выводами (вариант *а*) и без выводов (вариант *б*). В импульсном режиме эти конденсаторы групп МПО, М47, М330 могут работать при амплитуде однополярного импульса, не превышающей номинальное напряжение, при длительности 2 мкс и частоте следования не более 1000 имп/с.

Конденсаторы стеклокерамические многослойные температуростойкие (до 200°C) типа СКМ-Т выпускаются без выводов. Стеклокерамические конденсаторы К22У-1 выпускаются трех вариантов: незащищенные без

Таблица 2-4

Некоторые характеристики стеклянных, стеклоэмалевых и стеклокерамических конденсаторов

Тип конденса- тора	Группа по тем- пературной стабильности	Диапазон номинальных емкостей, пФ		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабочих температур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговеч- ность, тыс. ч	
		минималь- ная	максималь- ная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары			
							ускорение, м/с², не более	частота, Гц	ускорение, м/с², не более	число уда- ров, не более		линейное усе- корение, г
К21У-1 К21У-3	П120 П33, ПМО	9,1 9,1	510 5600	250 250	-60 -60	+300 +200	98,1 73,5	10—200 5—600	735 117,8	4000 5000	245 50	1,0 5,0 (до 155°С) 2,0 (155— 200°С)
К21-5	МПО, М47 М75, М330	2,2 2,2	160 330	70 160	-60	+100	98,1	10—600	735	1000	245	10,0 (до 30 В) 5,0 (от 30 до U_H)
К21-7	П120	56	20 000	50	-60	+155	73,5	5—80	117,8	10 000	491	10,0
К21-8	П60, П33, МПО М47, М150	9,1	1500	250	-60	+155	98,1	5—80 или 5—200	117,8 1471	10 000 6	491	10,0
СКМ	НЗ МПО, М47, М330, Н30 МПО, М47, М330	680 10 51	5100 2700 510	125 250 500	-600 -60	+100 +100, +125 +155	98,1	5—200	342	—	981	5,0

Тип конденса- тора	Группа по тем- пературной стабильности	Диапазон номинальных емкостей, пФ		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабочих температур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговеч- ность, тыс.ч	
		минималь- ная	макси- мальная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары			
							частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, м/с², не более	число уда- ров, не более		
СКМ-Т	Г, Д МПО, М47, М350	9 9 22	1000 510 560	125 250 250	-60	+200 +155 (МПО, М47)	10—200	58,6	—	—	196	0,5
	±50·10⁻¹°С	75 22	100 33	3000 5000	-60	+100	5—80	98,1	117,8	5000	491	0,5
КС	Р; О; М; П	9,1 10	200 1000	300 500	-60 -60	+155 +100	5—600	98,1	117,8 245	5000 9	491	1,0 5,0
	Н30 МПО, М47, М330, Н30	4700 30	15000 6800	12 35	-60	+85 +85 (МПО, М47, М330, Н30)	5—200	98,1	117,8	10000	491	5,0
К22У-1	М330 М47, МПО, М330, Н30	220 220	1500 4700	70 100	-60	+125 (МПО, М47, М330)	5—200	98,1	117,5	10000	491	5,0
	МПО, М47, М330	130	820	160								

выводов (вариант *а*), изолированные (вариант *б*) и неизолированные (вариант *в*).

Изолированный вариант целесообразно использовать в аппаратуре, подвергающейся длительному воздействию повышенной влажности. Максимально допускаемое напряжение конденсаторов К22У-1 устанавливается в зависимости от окружающей температуры: при увеличении температуры от 85 до 155°C максимальное напряжение снижается на 40—50% по сравнению с номинальным напряжением при 85°C.

Слюда, служащая диэлектриком в слюдяных конденсаторах, представляет собой природный минерал, способный расщепляться на очень тонкие пластинки (до 0,01 мм). Наиболее широко применяемая в конденсаторостроении слюда мусковит имеет малые значения тангенса угла диэлектрических потерь [$\operatorname{tg} \delta = (1 \div 2) \cdot 10^{-4}$], высокую электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость около семи. Слюдяные конденсаторы выпускают с электродами из металлической фольги (частично КСО) с электродами, нанесенными на слюду путем испарения металла в вакууме, или с серебряными обкладками (КСГ, СГМ и др) [16], полученными вжиганием серебра. Конденсаторные секции накладывают друг на друга и обжимают. Выводы соединяют с электродами либо пайкой, либо с помощью вкладных контактов. Емкость конденсаторов с фольговыми электродами имеет низкую стабильность особенно при резких изменениях температуры из-за возникновения зазора между электродами и слюдой. В то же время конденсаторы из серебряной слюды допускают меньшую нагрузку током, чем фольговые, и менее пригодны для работы при больших токах. В низковольтных цепях конденсаторы с вкладными контактами могут частично или полностью терять емкость из-за появления окисной пленки на поверхности контактов. Слюдяные конденсаторы имеют малые потери, высокое пробивное напряжение, небольшой коэффициент абсорбции и высокое сопротивление изоляции. Низковольтные слюдяные конденсаторы широко применяются в резонансных контурах, цепях блокировки и связи.

Наиболее массовыми слюдяными конденсаторами являются опрессованные пластмассой конденсаторы КСО, выпускаемые в десяти различных модификациях. Однако эти конденсаторы в соответствии с техническими

Некоторые характеристики основных типов слюдяных конденсаторов

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, пФ		Номиналь- ное напря- жение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки				Долговечность, тыс. ч	
	минималь- ная	максималь- ная		вибрация		удары					
				частота, Гц	ускорение, м/с², не более	ускорение, м/с², не более	число уда- ров, не более	Линейное ускорение, м/с², не более			
КСГ	470 470	100 000 27 000	500 1000	—60	+70	5—600	98,1	342 117,8	3 4000	245	5,0
	7500 51 100 100 1100 620 47 47 10 10	10 000 27 000 47 000 22 000 15 000 10 000 4700 3900 300 390	50 250 500 1000 1600 2000 2500 3000 5000 6300	—60	+70	5—600	98,1	342 117,8	3 4000	245	5,0
КСОТ	51 100 100 100 51	510 6800 10 000 10 000	250 500 1000 250	—60	+155	5—200	147	735 342	4000 3	981	5,0
	51 100 1000	6200 6800 3900	500 1000 1600	—60	+85	5—600	98,1	117,8	4000	245	5,0
СГМЗ СГГ СГО КЗЛУ-3	50 150 1000 51	10 000 200 000 400 000 6800	350 350 250, 500 250, 500	—60 —55 +10 —60	+70 +70 +35 100	5—600 5—80 5—2500	98,1 73,5 24,4 294	117,8 735 117,8 245	4000 4000 5000 5000	245 — — 245	5,0 10,0 5,0 10,0 при +85°С 1,0 при +100°С

условиями допускают эксплуатацию при относительной влажности только до 80% (при 25°C).

При высокой влажности (до 98%) и температуре +40°C применяют герметизированные слюдяные конденсаторы: КСГ, СГМ, СГО-С. Для эксплуатации при повышенных температурах предназначаются специальные температуростойкие конденсаторы: КСОТ (до +155°C), КСОТ-200 (до 200°C), КЗ1П-1 (до 500°C). Для применения в телефонных высокочастотных фильтрах выпускаются конденсаторы ССГ и СГМЗ, имеющие нестандартные значения емкости и повышенную точность (до $\pm 0,3\%$ при емкостях выше 3500 пФ). В электроизмерительной аппаратуре применяются конденсаторы СГО и СГО-С, имеющие увеличенные значения номинальных емкостей (до 0,4 мкФ) и повышенную точность (до $\pm 0,25-0,5\%$). В табл. 2-5 приведены параметры некоторых основных типов слюдяных конденсаторов малой мощности. Высоковольтные слюдяные конденсаторы большой мощности, выпускаемые на номинальные напряжения 1,0—25 кВ, имеют номинальные емкости от 100 пФ до 2,0 мкФ и предназначаются для эксплуатации при температурах от -60 до +50 или +70°C. Однако слюдяные высоковольтные конденсаторы успешно заменяются высоковольтными керамическими конденсаторами в электротермических устройствах и газонаполненными или вакуумными конденсаторами в мощных колебательных контурах. Поэтому в настоящее время они применяются сравнительно редко.

2-3. КОНДЕНСАТОРЫ С ОКСИДНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Конденсаторы на основе оксидных пленок [17] являются в настоящее время одними из наиболее перспективных, так как они обладают лучшими удельными характеристиками по сравнению с другими известными типами конденсаторов. Особенно бурное развитие получили оксидные конденсаторы, когда в качестве активных элементов схем стали применяться преимущественно полупроводниковые приборы.

Существенной особенностью большинства полупроводниковых приборов является их весьма низкое входное сопротивление по сравнению с электровакуумными приборами. Это приводит к необходимости использования в электрических цепях, содержащих полупроводники

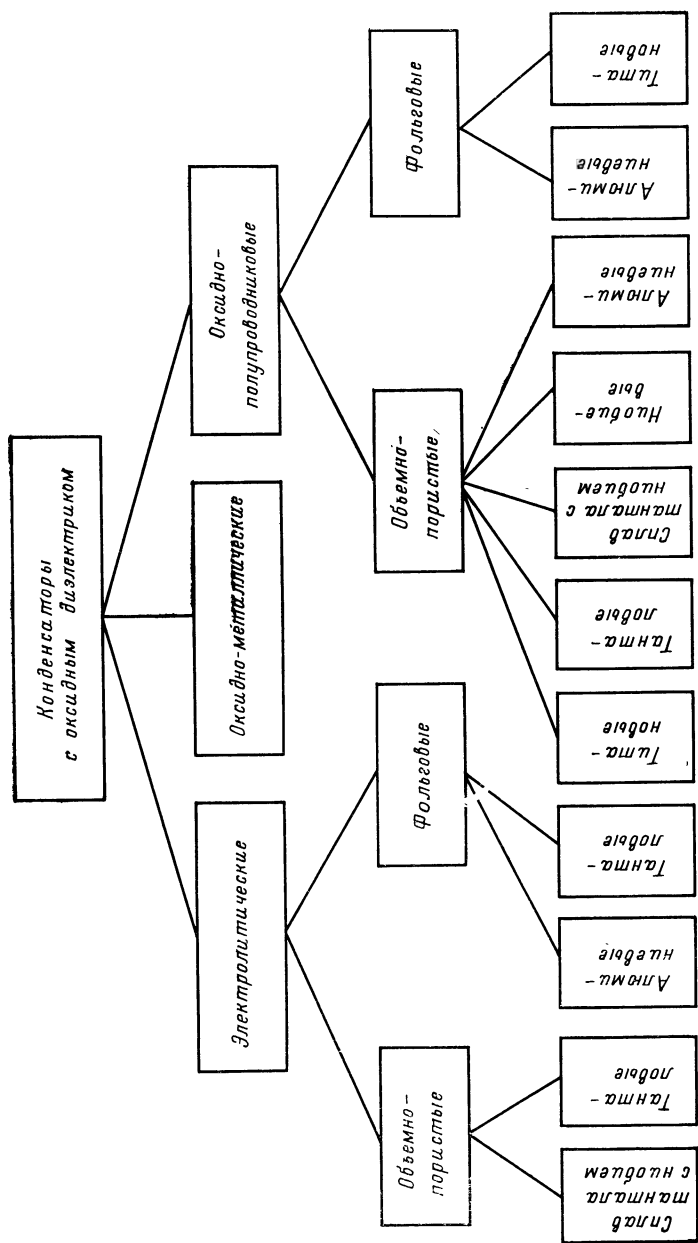


Рис. 2-6. Классификация конденсаторов с оксидным диэлектриком, выпускаемых отечественной промышленностью.

ковые приборы, конденсаторов с относительно большой номинальной емкостью и сравнительно низким номинальным напряжением. Указанным требованиям удовлетворяют конденсаторы, изготовленные с использованием оксидных пленок.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком, выпускаемые в нашей стране, удобно классифицировать так, как это показано на рис. 2-6.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком представляют класс конденсаторов, в которых в качестве диэлектрика используется тонкий слой оксида вентильного металла, образованный на поверхности этого металла электролитическим путем. Толщина слоя оксидной пленки очень мала, обычно составляет доли микрона и зависит от формовочного напряжения. Сочетание малой толщины диэлектрика с относительно высокой диэлектрической проницаемостью — в пределах 10—100 — и большой площадью обкладок позволяет изготавливать конденсаторы с оксидным диэлектриком с большими значениями номинальной емкости, достигающими сотен тысяч микрофарад и даже единиц Фарад (удельная емкость этих конденсаторов может достигать нескольких сотен мкФ/см²). Верхняя граница номинального напряжения конденсаторов с оксидным диэлектриком не превышает 450—600 В.

Оксидная пленка с высокой электрической прочностью и диэлектрической проницаемостью может быть создана на поверхности алюминия, тантала, ниобия и титана, которые используются в качестве одной из обкладок конденсаторов — анодов. Второй обкладкой, контактирующей с оксидной пленкой, служит жидкий или полужидкий электролит в жидкостных электролитических конденсаторах, пропитывающий волокнистую прокладку, полужидкий электролит большой вязкости или пастообразный электролит в сухих электролитических конденсаторах или полупроводник в оксиднополупроводниковых конденсаторах. Электрическая прочность оксидной пленки в десятки раз превосходит электрическую прочность всех других диэлектриков, что позволяет использовать в электролитических конденсаторах очень тонкую оксидную пленку. Электролитические конденсаторы имеют униполярную проводимость, вследствие чего их эксплуатация возможна только при положительном потенциале на аноде. При подаче на анод отрицательного потенциала проводимость оксидной пленки резко возрастает и че-

рез конденсатор проходит большой ток, способный вызвать его разрушение. Промышленностью выпускаются жидкостные танталовые и ниобиевые конденсаторы с объемнопористым анодом, сухие алюминиевые и танталовые, а также оксиднополупроводниковые конденсаторы.

Характерной особенностью конденсаторов с оксидным диэлектриком являются повышенные потери энергии, обусловленные тем, что второй (катодной) обкладкой в них является либо электролит, либо электронный полу-

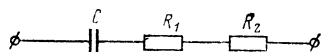


Рис. 2-7. Простейшая эквивалентная схема конденсатора с оксидным диэлектриком.

проводник, имеющие более высокие величины удельного сопротивления по сравнению с металлической обкладкой. Это обстоятельство накладывает особый отпечаток на электрические характеристики конденсаторов с оксидным диэлектриком. Для них характерны повышенный уровень потерь по

сравнению с другими типами конденсаторов и значительная зависимость тангенса угла потерь и эффективной емкости от частоты и температуры. Простейшая эквивалентная схема конденсатора представлена на рис. 2-7. Тангенс угла потерь определяется двумя факторами: диэлектрическими потерями в самом диэлектрике R_1 и потерями энергии, характеризуемыми последовательным сопротивлением R_2 , куда входят потери в электронном полупроводнике или электролите, а также в контактных переходах с металлическими слоями, покрытиями и т. д.

Типовые зависимости тангенса угла потерь и емкости от температуры окружающей среды и частоты для конденсаторов разных групп показаны на рис. 2-8—2-10.

Электролитические алюминиевые фольговые конденсаторы К50 имеют пониженную стабильность своих параметров по сравнению с конденсаторами других типов с оксидным диэлектриком, но обладают перед ними существенным преимуществом в отношении стоимости, так как алюминий является более дешевым и недефицитным металлом по сравнению с другими вентильными металлами, применяемыми в конденсаторостроении.

В табл. 2-6 приведены основные характеристики конденсаторов этого типа, выпускаемых промышленностью.

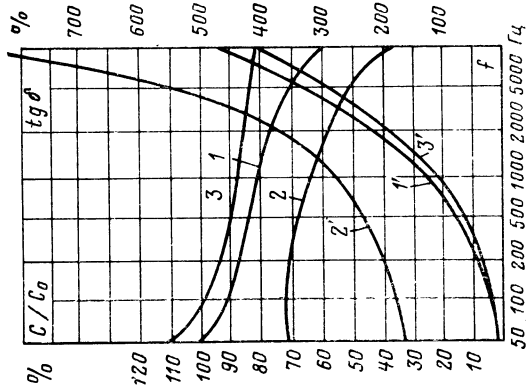


Рис. 2-8. Зависимость последовательной емкости и тангенса угла потерь от частоты и температуры алюминиевого фольгового электролитического конденсатора К50-6; 6 В.
1, 1' — емкость и тангенс угла потерь при +20°C; 2, 2' — емкость и тангенс угла потерь при -10°C; 3, 3' — емкость и тангенс угла потерь при +70°C.

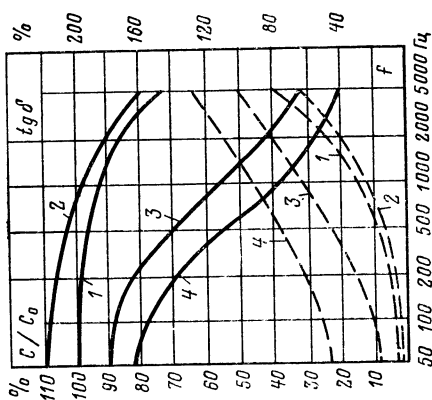


Рис. 2-9. Зависимость последовательной емкости и тангенса угла потерь от частоты и температуры танталового электролитического конденсатора с объемно-пористым анодом типа К52-2, 10 мкФ.
1 — при +20°C; 2 — при -40°C; 3 — при +20°C; 4 — при -60°C; — емкость; — — — тангенс угла потерь.

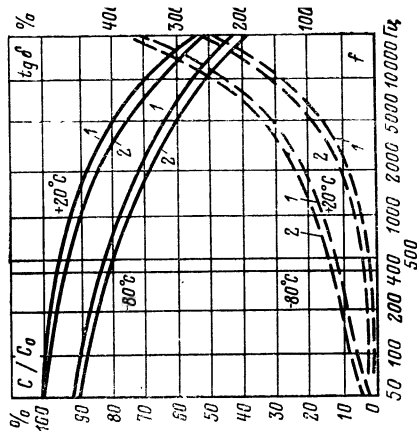


Рис. 2-10. Зависимость последовательной емкости и тангенса угла потерь от частоты танталового оксидно-полупроводникового конденсатора (с объемно-пористым анодом) К53.
1 — 20 В × 6,8 мкФ; 2 — 6 В × 100 мкФ; — емкость; — — — tg δ.

Некоторые характеристики основных типов оксидных конденсаторов

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минимальная	максимальная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары		линейное ускорение, м/с²	
						частота, Гц	ускорение, м/с²	ускорение, м/с²	число ударов		
K52-6	22	100	3	-60	+85	5—5000	19,6	До 75	4000	До 150	10,0 при T=+70°C 5,0 при T=+85°C
	15	470	6,3								
	10	220	16								
	6,8	150	25								
	4,7	100	30								
K52-7	3,3	68	50	-60	+155	5—5000	19,6	До 75	4000	До 150	10,0 до 70°C 5,0 при 70—85°C 2,0 при 85—100°C
	2,2	47	63								
	1,5	33	100								
	750	—	63								
	33	330	15								
K52-5	22	220	25	-60	+200	5—5000	19,5	1470	4000	1470	0,5 при 100—155°C 0,05 при 155—200°C
	15	150	50								
	10	100	70								
	6,8	68	90								
	3,3	33	150								
	2,2	22	250								
	1,5	—	300								
	1,5	—	400								
	10	—	450								
	6,8	—	500								

10,0 при
 $T=+70^{\circ}\text{C}$
5,0 при
 $T=+85^{\circ}\text{C}$

2,0 при $T=85^{\circ}\text{C}$

10,0 до 70°C
5,0 при $70-85^{\circ}\text{C}$
2,0 при $85-100^{\circ}\text{C}$
0,5 при
 $100-155^{\circ}\text{C}$
0,05 при
 $155-200^{\circ}\text{C}$

Продолжение табл. 2-6

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минимальная	максимальная		вибрация		удары		линейное ускорение, м/с²			
				частота, Гц	ускорение м/с²	ускорение, м/с²	число ударов				
ЭТО	80	1000	6								0,05 ч, при 155—200°С 0,5 ч при 100—155°С
	50	400	15								
	30	300	25								
	20	200	50								
	15	150	70								
	10	100	90								
	5	50	150	—60	+200	10—600	98,1	147	2000	342	
	3	30	250								
	—	25	300								
	—	2	400								
—	15	450									
—	10	600								2,0 при 70—100°С 5,0 ч до 70°С	
К52-1	22	100	3								5,0
	15	68	6								
	10	47	15								
	6,8	33	25								
	4,7	22	35	—60	+85	5—600	73,5	342	10 000	1470	
	3,3	15	50			5—200	39,2				
2,2	10	70									
1,5	100	100									

Продолжение табл. 2-6

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минимальная	максимальная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары			
						частота, Гц	ускорение, м/с²	ускорение, м/с²	число ударов	линейное ускорение, м/с²	
K52-2	80	1000	6	-60	+200	5—2500	196,2	1470	4000	1470	50 ч при 155—200°C 500 ч при 100—155°C 2000 ч при 85—100°C 10 000 до 70°C
	50	400	15	-60	+155						
	30	300	25	-60							
	20	200	50								
	15	150	70								
	10	100	90								
K50-3И	—	500	450	-40	+60	5—600	73,5	178,5	5000	245	0,5
	50	5000	6								
K50-6 (поляр- ные)	10	4000	10								
	1	4000	15								
	1	4000	25								
	1	200	50								
	1	20	100	-10	+70	5—80	24,5	117,8	5000	—	5,0
	1	10	160								

Продолжение табл. 2-6

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минимальная	максимальная		вибрация		удары		линейное ускорение, м/с²			
				частота, Гц	ускорение, м/с²	ускорение, м/с²	число ударов				
К50-6 (неполяр- ные)	5	50	15	—10	+70	5—80	24,5	117,8	5000	—	5,0
	—	10	25								
	—	50+50+30+ +30	40								
К50-14	200+100+	150+150+	350	—10	+85	5—80	19,6	147	5000		5,0
	+50+50	+50+50	450								
	—	5000+5000+ +1000+1000									
ЭТ, ЭТН	50	500	6								
	50	250	15								
	20	100	30	—60	+100	5—2000	147	735	4000	981	2,0
	10	50	60								
	5	30	100								
	5	20	150								
К50-3Ф	500	1000	300	—25	+40	5—600	73,5	117,8	5000	245	10 000 импульсов
	—	500	450								

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минимальная	максимальная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары		линейное ускорение, м/с²	
						частота, Гц	ускорение, м/с²	ускорение, м/с²	число ударов		
К50-24	220	10 000	6,3	-25	+70	1—1000	98,1	147	5000	490	5,0
	47	10 000	16								
	22	4700	25	-40	+70						
	10	200	63								
	4,7	220	100								
2,2	220	160									
К50-7	20	500	160								
	10	200	250	-10	+70	5—80	49,1	147	5000	—	5,0
	5	200	300								
	5	100	350								
	5	100	450								
К50-15	68	680	6,3	-60	+125	5—3000	147	1470	4000	1470	5,0
	47	680	16								
	22	330	25								
	10	100	50								
	4,7	47	100								
	4,7	33	160								
2,2	22	250									

Продолжение табл. 2-6

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч	
	минимальная	максимальная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары		линейное ускорение, м/с²		
						частота, Гц	ускорение, м/с²	ускорение, м/с²	число ударов			
K50-3	10	5000	6	—	—	5—600	73,5	342	10 000	245	5,0 (из них 1,0 при +60—+70°С +60—+70°С	
	2	2000	12	—	—	5—1000	До 7,5	1470	9	—		
	2	2000	25	—40	+70	5—1000	До 7,5	1470	9	245		
	1	2000	50	—	—	5—1000	До 7,5	1470	9	245		
	1	200	100	—	—							
	2	200	160									
		150+150	250									
	5	150	300									
	2	40+40	350									
K53-1A	2	50	450								10,0	
	0,1	100	6,3									
	0,068	68	15									
	0,047	47	20	—60	+125	5—2500	19,6	1470	4000	2452		
	0,033	33	30									
	0,033	22	40									
	0,22	15	50									

Продолжение табл. 2-6

Тип ком- пенсатора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, В	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минимальная	максимальная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары		линейное ускорение, м/с²	
						частота, Гц	ускорение, м/с²	ускорение, м/с²	число ударов		
К53-1Б	150	330	6,3	—60	+85	5—3000	147	1470	4000	2452	10,0
	100	220	18								
	68	150	20								
	47	100	30								
К53-18	1,0	330	6,3	—80	+85	1—5000	196,2	1470	4000	1962	10,0
	0,68	150	16								
	0,47	100	20								
	0,33	68	30								
К53-16	0,22	22	40								
	1,5	10	1,6	—60	+85	5—5000	392	1470	4000	981	2,0
	1,0	4,7	3								
	2,2	3,3	4								
	0,68	2,2	6,3								
	0,47	1,5	10								
	0,33	1,0	16								
	0,22	0,68	20								
	0,01	0,47	30								

Продолжение табл. 2-6

Тип конденса- тора	Диапазон номинальных емкостей, мкФ		Номинальное нап- ряжение, в	Интервал рабо- чих темпера- тур, °С		Допустимые механические нагрузки					Долговечность, тыс. ч
	минимальная	максимальная		минималь- ная	максималь- ная	вибрация		удары		линейное ускорение, м/с²	
						частота, Гц	ускорение, м/с²	ускорение, м/с²	число ударов		
K53-1	0,1	100	6	—80	+85	10—2000	98,1	735	4000	981	5,0
	0,1	0,68	10								
	0,068	68	15								
	0,047	47	20								
	0,033	33	30								
K53-4	0,68	100	6	—60	+85	5—2500	196,2	1470	4000	2452	5,0
	0,47	68	15								
	1,0	47	20								
K53-7	1	47	15	—60	+85	5—2500	196,2	1470	4000	1470	5,0
	0,1	22	30								
K53-8	10	20	1,5	—60	+85	5—2500	176,6	1470	4000	490	5,0
	5	10	3								
	2	5	6								
	0,5	2	15								

На рис. 2-11 показаны типичные температурно-частотные характеристики емкости и $\operatorname{tg} \delta$ танталовых фольговых конденсаторов группы К51 на примере конденсаторов типа ЭТ.

При сравнении температурно-частотных характеристик конденсаторов К51 (танталовых) с характеристиками конденсаторов К50 (алюминиевых) обнаруживается, что при крайних отрицательных температурах емкость и $\operatorname{tg} \delta$ танталовых конденсаторов меньше зависят от час-

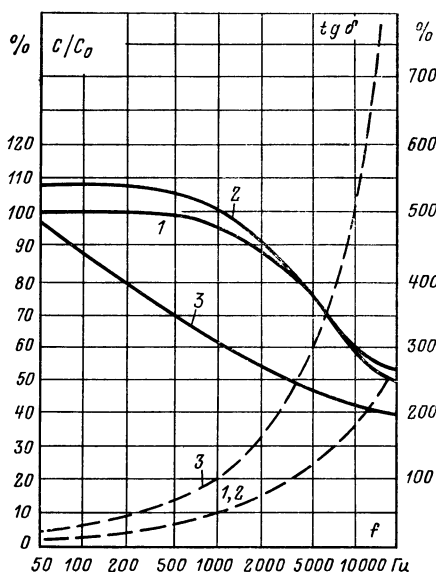


Рис. 2-11. Зависимость последовательной емкости и тангенса угла потерь от частоты и температуры танталового электролитического конденсатора типа ЭТ (с гладким анодом) на напряжение 30 В.

1 — при +20°C; 2 — при +85°C; 3 — при -60°C;
 — — — емкость; — — — $\operatorname{tg} \delta$.

тоты, чем у алюминиевых. Танталовые конденсаторы имеют значительно меньшие токи утечки по сравнению с алюминиевыми конденсаторами.

В жидкостных электролитических танталовых конденсаторах серии К52 диэлектрическая оксидная пленка образуется на объемно-пористом теле (аноде), получаемом путем спекания танталового порошка. Таким путем удастся получать конденсаторы с рекордно высокими значениями удельной емкости. Основные характеристики конденсаторов группы К52, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 2-6.

Типовые температурно-частотные зависимости емкости и тангенса угла потерь конденсаторов К52 показаны на рис. 2-9.

У твердых оксиднополупроводниковых конденсаторов серии К53 роль второй (катодной) обкладки выполняет электронный полупроводник, обычно двуокись марганца, наносимый путем пиролиза из пятиокиси марганца на объемно-пористый анод, предварительно оксидированный.

На рис. 2-10 представлены температурно-частотные характеристики емкости и $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов К53 на примере конденсаторов К53-1.

Сравнение этого рисунка с приведенными выше для электролитических алюминиевых и танталовых конденсаторов показывает, что стабильность емкости и $\operatorname{tg} \delta$ оксиднополупроводниковых конденсаторов выше, чем стабильность аналогичных параметров электролитических конденсаторов. Это позволяет применять оксиднополупроводниковые конденсаторы при более низких температурах и более высоких частотах, чем электролитические.

Для оксиднополупроводниковых конденсаторов серии К53 (например, К53-1, К53-4, К53-8) существенное значение имеет величина сопротивления цепи, по которой подводится ток от источника питания к конденсатору. Так как полупроводник (например, MnO_2), служащий одним из электродов в этих конденсаторах, не обеспечивает быстрого и качественного восстановления оксидного слоя в дефектных местах, то это обстоятельство в сочетании с малым внутренним сопротивлением приводит у отдельных образцов к внезапному лавинообразному нарастанию токов утечки, которые могут вывести конденсатор из строя. Для устранения возможности появления таких скачков тока утечки и создания условий для восстановления дефектных мест в оксидном слое необходимо, чтобы цепь, по которой подводится ток к конденсатору, имела сопротивление постоянному току не менее 3 Ом на 1 В рабочего напряжения. При расчете сопротивления цепи необходимо учитывать и внутреннее сопротивление источника питания. Экспериментальные исследования показали, что при снижении сопротивления цепи с 3 Ом/В до 0,1 Ом/В вероятность отказов конденсатора этой серии увеличивается в 12 раз.

2-4. КОНДЕНСАТОРЫ С ГАЗООБРАЗНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

Особенностью газообразных диэлектриков являются малое значение тангенса угла диэлектрических потерь (до 10^{-5}) и высокая стабильность электрических параметров.

В качестве диэлектрика используются воздух, сжатый газ (азот, фреон, элегаз), вакуум. Воздушные конденсаторы применяются в измерительной технике при низких напряжениях как образцовые с емкостью до нескольких тысяч пикофард. Для работы при частотах до 1 МГц применяются воздушные конденсаторы плоского типа КВМ с диаметром 210 мм (емкость 50—400 пФ) и КВС с диаметром 290 мм (емкость 1000—4000 пФ) при отклонении емкости от номинальной $\pm 0,5\%$ и $\pm 0,1\%$.

Воздушные конденсаторы плоского исполнения имеют заметное изменение емкости из-за собственной индуктивности при частотах выше 0,5—1 МГц. На указанных частотах обычно применяют цилиндрические конденсаторы коаксиальной конструкции типа КВЧ с диаметром 25 мм, емкостью 25—200 пФ, имеющие резонансную частоту 283 МГц (для 200 пФ) и 3000 МГц (для 25 пФ). Конденсаторы этого типа рассчитаны на работу при температуре 15—20°C, относительной влажности до 70% и номинальном напряжении 500 В при частоте 50 Гц.

Для высоких напряжений предназначаются газонаполненные и вакуумные конденсаторы. Сжатый газ в газонаполненных конденсаторах находится под давлением до 14 атм, что увеличивает электрическую прочность по сравнению с воздухом примерно в 5 раз. Газонаполненные конденсаторы емкостью 50—100 пФ имеют номинальные напряжения до 100—500 кВ и применяются, в основном, в высоковольтных измерительных устройствах, а конденсаторы емкостью до нескольких тысяч пикофард имеют номинальные напряжения до 30—50 кВ и применяются в контурах мощных передающих устройств. На частотах выше 0,5 МГц для газонаполненных конденсаторов приходится снижать реактивную мощность из-за возрастания потерь в обкладках. Газонаполненные конденсаторы имеют ряд недостатков: относительно большую массу из-за применения массивных корпусов, выдерживающих высокое давление газа; необходимость периодической подпитки газом из-за его постепенной утечки (колебание давления газа на $\pm 0,2\%$ дает изменение емкости около 0,01%); повышенные потери в металлических частях.

На частотах выше 0,5 МГц для радиопередатчиков применяются преимущественно вакуумные конденсаторы [18, 19], которые отличаются высокой электрической прочностью, малыми потерями, отсутствием зависимости

диэлектрической проницаемости от частоты и способностью к самовосстановлению после пробоя. Вакуумные конденсаторы применяются в мощных коротковолновых генераторах в качестве контурных, блокировочных, фильтровых, разделительных, служат накопительными конденсаторами в мощных формирующих линиях, широко применяются в высоковольтной, высокочастотной и импульсной аппаратуре. По сравнению с газонаполненными вакуумные конденсаторы имеют более простую и легкую конструкцию, меньшие потери и лучшую температурную стабильность, более устойчивы к вибрации, допускают более высокое значение реактивной мощности.

Емкость вакуумных конденсаторов создается системой электродов в виде коаксиально расположенных цилиндров, заключенных в стеклянные колбы или корпуса из вакуумплотной керамики. Высокая электрическая прочность вакуумного промежутка позволяет иметь малые зазоры между электродами и получать большие значения номинальной емкости (до 1200 пФ). При малых межэлектродных промежутках даже небольшие неоднородности на поверхности электродов (царапины, заусенцы, неровности и т. д.) могут создать высокие градиенты напряженности электрического поля и привести к электрическому пробое конденсатора. При этом через конденсатор протекает большой разрядный ток, который может оплавить материал электрода, частицы которого осаждаются на их холодных частях и на внутренней поверхности корпуса конденсатора. Эти частицы в дальнейшем при эксплуатации конденсатора могут перемещаться под воздействием электрического поля и, попадая между электродами, вызвать пробой конденсатора. Поэтому, хотя вакуумные конденсаторы и являются самовосстанавливающимися после единичных пробоев при перегрузках по напряжению, допускать такие пробои не рекомендуется.

Первые образцы вакуумных конденсаторов имели алюминиевые электроды, которые навинчивались на молибденовые выводы, спаянные со стеклянной оболочкой (конденсаторы типов В, КВ, ВМ, ВВ). Эти конденсаторы, выпускаемые на номинальную емкость от 25 до 300 пФ и номинальное напряжение высокой частоты 10, 15, 25 кВ (амплитудное), допускают максимальные токи высокой частоты от 12 до 25 А и могут эксплуатироваться на частотах до 7,5—30 МГц.

В последние годы были разработаны и начали выпускаться промышленностью новые типы вакуумных конденсаторов, например К61-1-12. В новых вакуумных конденсаторах отсутствует сборка пакетов с помощью клепки, применявшаяся в первых образцах, а для электродов вместо алюминия применена бескислородная медь. Применены также технологические новшества, позволившие повысить качество конденсаторов. Основные характеристики этих конденсаторов приведены в табл. 2-7.

Таблица 2-7

Основные характеристики вакуумных конденсаторов

Тип конденсатора	Емкость, пФ		Номинальное напряжение (амплитудное), кВ	Максимальный ток А	Максимальная частота, МГц	Габариты, мм	
	минимальная	максимальная				диаметр	высота
К61-1	10	300	25	50	30	от 76 до 135	от 170 до 200
К61-2	500	1000	16	125	3	105, 120	235
К61-3	25	500	5	25	30	46, 58	95
К61-4	50	400	45	75	30	от 105 до 160	256
К61-5	50	400	25	100	30	118	205
К61-6	15	300	10	25	30	50, 59	92
К61-7	50	300	10	50	30	62, 72	108
К61-8	3,5	10	75	—	—	64	277
К61-9	50	500	25	100	30	70, 98, 118	125, 162
К61-10	750	1000	25	100	3,0	130	130
К61-11	500	1000	10	50	30	91, 106	150
К61-12	10	500	15	50	30	72, 93	113

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

**ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ
В РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ**

**3-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
КОНДЕНСАТОРОВ**

Развитие радиотехники и электроники выдвигает и новые требования к составным элементам аппаратуры, в частности к конденсаторам. Конденсаторы выполняют разнообразные функции в схемах аппаратуры и испытыва-

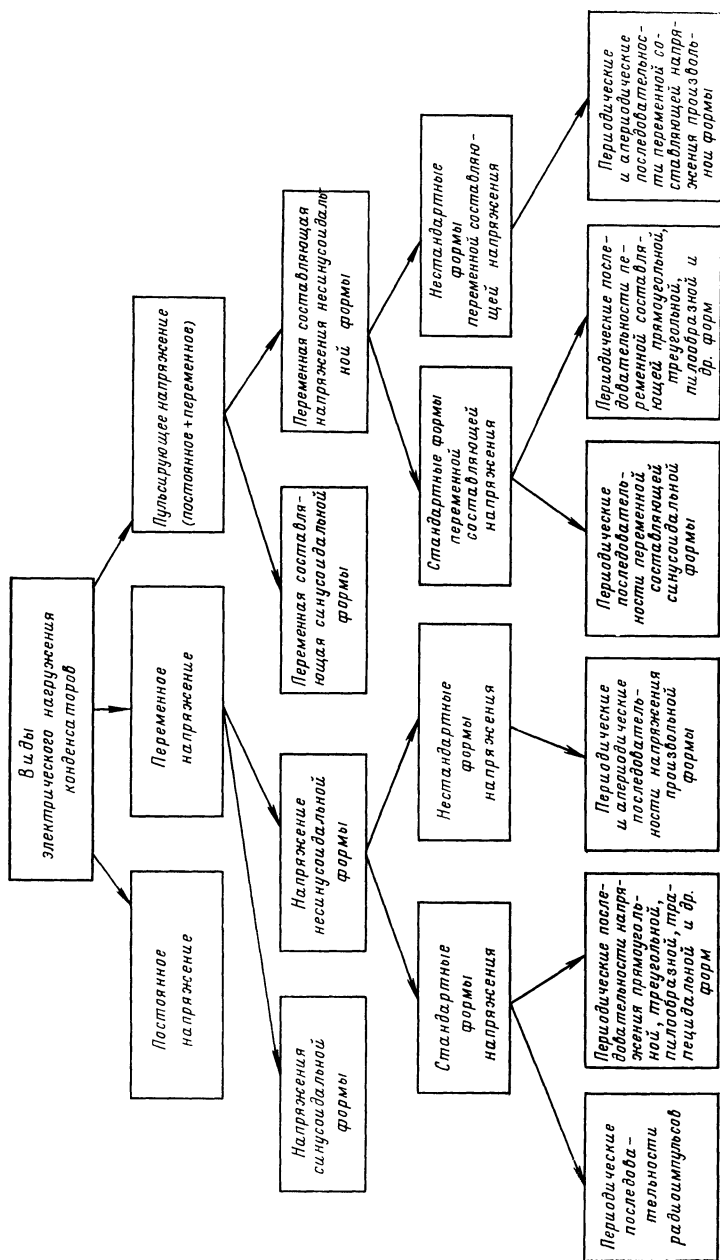


Рис. 3-1. Классификация видов электрического нагружения конденсаторов.

ют воздействие различных электрических нагрузок. Многообразие видов этих нагрузок условимся классифицировать в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3-1.

Напряжение, воздействующее на конденсатор, может быть постоянным, переменным и пульсирующим.

Переменное напряжение или переменная составляющая напряжения (в случае пульсирующего напряжения) могут быть синусоидальной и несинусоидальной форм.

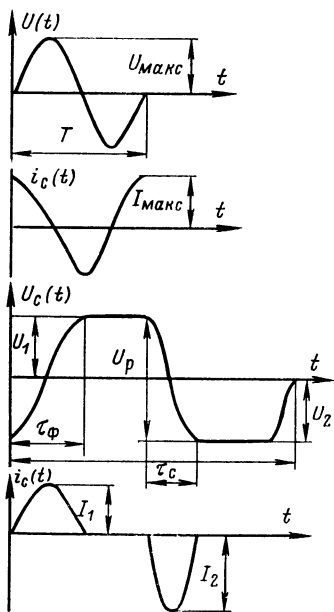
Переменное напряжение (переменную составляющую напряжения) несинусоидальной формы условимся подразделять на стандартные и нестандартные формы.

Стандартными будем называть периодические переменные напряжения, имеющие прямоугольную, трапециевидную, треугольную, экспоненциальную, пилообразную и другие формы, легко поддающиеся математической обработке.

К этой же группе будем относить периодические последовательности видео- и радиоимпульсов.

Под нестандартными переменными напряжениями (переменными составляющими) будем понимать периодические и аperiodические

Рис. 3-1а. Параметры, характеризующие электрические нагрузки.



ские напряжения произвольной формы, не вошедшие в класс стандартных.

Электрические нагрузки, воздействующие на конденсатор, будем характеризовать параметрами, показанными на рис. 3-1а и перечисленными ниже:

$U_{\text{макс}}$ — амплитуда напряжения; U — действующее значение напряжения; $I_{\text{макс}}$ — амплитуда тока, протекающего через конденсатор; I — действующее значение тока, протекающего через конденсатор; U_1 — положи-

тельный пик напряжения на конденсаторе; U_2 — отрицательный пик напряжения на конденсаторе; $U_p = U_1 + +U_2$ — размах переменного напряжения на конденсаторе; τ_ϕ — длительность нарастания напряжения на конденсаторе; τ_c — длительность спада напряжения

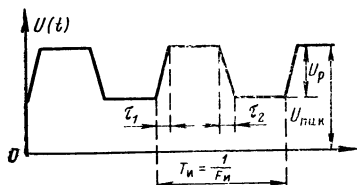


Рис. 3-2. Пульсирующее напряжение на конденсаторе.

на конденсаторе; $T_n = \frac{1}{F_n}$ — период и частота следования импульсов; I_1 — величина положительного пика тока; I_2 — величина отрицательного пика тока; при наличии постоянной составляющей напряжения (рис. 3-2) введем еще пиковое напряжение на конденсаторе $U_{пик}$.

3-2. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК КОНДЕНСАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАПЯЖЕНИИ

Работоспособность конденсатора при переменном напряжении ограничивают в основном следующие факторы: 1) тепловыделение, пропорциональное средней мощности P_n , которое может резко возрастать при недопустимом нагреве элементов конструкции конденсатора и создавать условия для теплового пробоя конденсатора; 2) напряженность электрического поля, действующего на диэлектрик конденсатора и вызывающего его электрическое старение (например, за счет частичных разрядов) вплоть до пробоя; 3) ток, протекающий через конденсатор, при большой плотности которого возможны локальный перегрев и разрушение контактного узла, возгорание металлизированных обкладок конденсатора и т. д.; 4) температура окружающей среды.

Представим качественную картину зависимости допустимой амплитуды синусоидального напряжения от частоты f (рис. 3-3). Эта зависимость условно может быть разделена на три области.

В первой области (при $f \leq f_1$) потери энергии в конденсаторе невелики и $U_{\text{макс. доп}}$ определяется только электрической прочностью, которая в этом диапазоне частот практически не зависит от частоты. Тогда можно

принять, что величина $U_{\text{макс. доп}} = U_{\text{макс}}(f) = \text{const.}$ При определении $U_{\text{макс. доп}}$ учитывается, что в результате длительного воздействия электрического поля рабочие диэлектрики и другие материалы конструкции конденсатора постепенно ухудшают свои основные свойства из-за электрического старения, завершающегося, в конечном

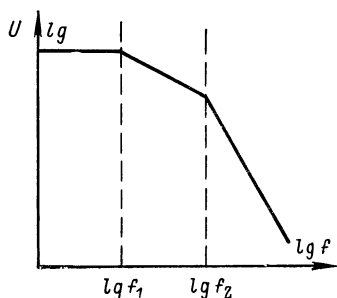


Рис. 3-3. Общий вид зависимости допустимой амплитуды напряжения синусоидальной формы на конденсаторе от частоты.

счете, пробоем конденсатора. Поэтому обычно выбирают

$$U_{\text{макс. доп}} \leq U_{\text{макс } 1},$$

где $U_{\text{макс } 1}$ — амплитуда напряжения, при котором конденсатор сохраняет работоспособность в течение требуемого срока службы.

Во второй области (в интервале частот от f_1 до f_2) нагрев конденсатора достаточно заметен и определяется в основном диэлектрическими потерями. В этом случае допускаемое рабочее

напряжение будет определяться уже допустимым нагревом конденсатора. Определим это соотношение.

Температура наиболее нагретой точки конденсатора, при которой он сохраняет работоспособность:

$$T_{\text{макс}} = T_{\text{окр}} + \Delta T,$$

где $T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды; ΔT — температура перегрева наиболее нагретой точки конденсатора над температурой окружающей среды.

Если период переменного напряжения значительно меньше тепловой постоянной конденсатора, а время воздействия этого напряжения значительно больше этой постоянной, величина ΔT определяется соотношением

$$\Delta T = P_{\text{п}} K,$$

где $P_{\text{п}}$ — средняя мощность, рассеиваемая конденсатором в виде потерь; K — обобщенное термическое сопротивление конденсатора.

Точный расчет коэффициента K весьма трудоемок и выходит за рамки настоящей работы.

Для практических случаев применения можно использовать следующие методики.

Для конденсаторов небольших габаритов (с площадью боковой поверхности менее 100 см²), а также при небольших уровнях ΔT (5÷10°C) можно полагать, что

$$K = \frac{1}{\alpha S},$$

где S — боковая поверхность конденсатора; α — коэффициент теплоотдачи [1].

Для конденсаторов средних размеров с площадью боковой поверхности 100—1000 см² можно воспользоваться следующими соотношениями.

Температура корпуса конденсатора

$$T_k = T_{\text{окр}} + \Delta T_k,$$

где ΔT_k — температура перегрева корпуса конденсатора относительно температуры окружающей среды.

Температура наиболее нагретой внутренней точки конденсатора

$$T_{\text{макс}} = T_k + (K^* - 1) \Delta T,$$

где $(K^* - 1) \Delta T$ — внутренний температурный перепад.

Значения коэффициентов α и K^* приведены в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Коэффициенты α и K^* при разных покрытиях конденсаторов]

Коэффициенты	Вид покрытия		
	Голая сталь	Серая краска	Тусклая черная краска
$\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
K^*	1,5	1,7	1,75

Величина ΔT определяется в этом случае соотношением

$$\Delta T = T_{\text{макс}} - T_{\text{окр}} = \frac{P_{\text{п}} K^*}{\alpha S}. \quad (3-1)$$

Потери энергии в конденсаторе определяются соотношением

$$P_{\Pi} = \frac{U_{\text{макс}}^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}, \quad (3-2)$$

где последовательная емкость C и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ измерены на рабочей частоте f при температуре $T_{\text{макс}}$.

Подставляя (3-2) в (3-1) и решая это уравнение относительно $U_{\text{макс}}$, получим $U_{\text{макс.доп}}$, при котором ΔT не превышает заданного уровня $\Delta T_{\text{доп}}$:

$$U_{\text{макс. доп}} \leq \sqrt{\frac{\alpha S (T_{\text{макс}} - T_{\text{окр}})}{K^*} \left(\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\omega C \operatorname{tg} \delta} \right)}. \quad (3-3)$$

В третьей области (при частотах выше f_2) начинают сказываться потери в неметаллических частях конденсатора и составляющая $\operatorname{tg} \delta$ за счет потерь в металлических частях начинает быстро возрастать с ростом частоты, ибо $\operatorname{tg} \delta_m = \omega C r$, где r — сопротивление, эквивалентное потерям в металлических частях. Здесь следует также учесть, что с ростом частоты начинает сказываться поверхностный эффект, приводящий к еще большему возрастанию $\operatorname{tg} \delta$. Поэтому в этой области частот $U_{\text{макс.доп}}$ должно ограничиваться таким уровнем, чтобы ток, протекающий через конденсатор, не превосходил допустимого значения для данной конструкции конденсаторов.

Следует отметить, что на практике резкие границы между областями, приведенными на рис. 3-3, не наблюдаются, так как перечисленные выше факторы могут проявляться и в соседних областях.

3-3. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

При несинусоидальном напряжении для расчета потерь энергии в конденсаторе авторы считают наиболее целесообразным использование метода, базирующегося на переходной проводимости $h(t)$ [20, 21, 22, 26]. Функция $h(t)$ характеризует реакцию двухполюсника на скачок напряжения, выражает зависимость изменения его проводимости во времени и является временной характеристикой, т. е. описывает процесс установления тока. Эта характеристика удобна тем, что, с одной стороны, она

не зависит от формы воздействующего напряжения, с другой стороны, отражает способность диэлектрика запасать и рассеивать электрическую энергию. Переходную проводимость диэлектрика конденсатора можно представить в виде конечной суммы экспонент

$$h(t) = \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_k} e^{-\frac{t}{r_k C_k}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_k} e^{-\frac{t}{\theta_k}}.$$

Представление о переходной проводимости в таком виде оправдано для технических диэлектриков в предположении наличия у них набора времен релаксации. Существование нескольких времен релаксации можно связать с различными видами поляризации в диэлектрике или с наличием ионов, являющихся носителями зарядов, с различными энергиями активации.

Процесс накопления объемного заряда в диэлектрике также может быть охарактеризован соответствующей постоянной времени.

Эквивалентная схема конденсатора, имеющего такую переходную проводимость, может быть представлена в виде параллельного соединения n -цепочек $r_k C_k$ с постоянными времени

$$\theta_k = r_k C_k.$$

В этом случае выражение потерь энергии в конденсаторе может быть представлено в следующем обобщенном виде:

$$P_n = \sum_{i=1}^n P_{nk} = \frac{U_p^2}{T_n} \sum_{k=1}^n \alpha_k C_k N_k = U_p^2 C_{\text{ном}} F_n N, \quad (3-4)$$

где P_{nk} — потери энергии, обусловленные k -й цепочкой $r_k - C_k$; $C_{\text{ном}}$ — номинальная емкость конденсатора, измеренная на частоте 50 Гц; T_n , F_n — период и частота повторения напряжения; $\alpha_k = C_k / C_{\text{ном}}$; N_k — коэффициент, характеризующий потери энергии в конденсаторе за счет k -й цепочки $r_k - C_k$ при данной форме напряжения; $N =$

$\sum_{k=1}^n \alpha_k N_k$ — коэффициент, характеризующий потери энергии в конденсаторе при данной форме напряжения.

Несинусоидальное напряжение может быть разнообразным по форме, что обуславливает необходимость определения выражений для N_k в каждом отдельном случае.

Рассмотрим процедуру нахождения коэффициента N_k , полагая, что параметры θ_k , r_k , C_k , α_k известны, а затем рассмотрим методы определения этих параметров.

Эта процедура состоит в следующем. При заданном законе изменения напряжения и известной переходной проводимости конденсатора с помощью суперпозиционного метода, например метода наложения частных решений (для получения которых используется интеграл Дюамеля), находят ток установившегося процесса. Затем по известным мгновенным значениям $u(t)$ и $i(t)$ в установившемся режиме находят среднюю мощность за период $P_{пк}$, характеризующую потери энергии в цепи $r_k - C_k$, а коэффициент N_k определяют из соотношения

$$N_k = \frac{P_{пк}}{U_p^2 C_k F_H}. \quad (3-5)$$

В качестве примера выведем формулу для N_k в случае, когда на цепочку $r_k - C_k$ воздействует трапецеидальное напряжение с линейным фронтом и спадом.

Определим сначала ток от воздействия одного периода напряжения, т. е. когда напряжение источника изменяется по закону

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{для } t < 0; \\ \frac{U_{\max}}{\tau_{\phi}} t & \text{для } 0 < t < \tau_{\phi}; \\ U_{\max} & \text{для } \tau_{\phi} < t < \tau_H - \tau_c; \\ \frac{U_{\max}(\tau_H - t)}{\tau_c} & \text{для } \tau_H - \tau_c < t < \tau_H; \\ 0 & \text{для } \tau_H < t < T_H. \end{cases} \quad (3-6)$$

Представим это напряжение в виде алгебраической суммы четырех неограниченно нарастающих функций $u_*(t)$, $u_*(t - \tau_{\phi})$, $u_*(t - \tau_H + \tau_c)$ и $u_*(t - \tau_H)$, отличающихся друг от друга сдвигом по времени (рис. 3-4), где

$$u_*(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \frac{U_{\max}}{\tau_{\phi}} t & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (3-7)$$

В этом случае достаточно найти реакцию конденсатора на напряжение $U_*(t)$. Зная эту реакцию, легко, пользуясь принципом наложения, определить реакцию, вызываемую напряжением

$$u(t) = u_*(t) - u_*(t - \tau_\Phi) - u_*(t - \tau_n + \tau_c) + u_*(t - \tau_n).$$

С помощью интеграла Дюамеля определим ток, вызываемый напряжением $u_*(t)$:

$$i(t) = u_*(0) h(t) + \int_0^t u'(\tau) h(t - \tau) d\tau. \quad (3-8)$$

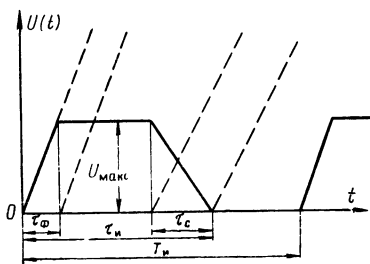


Рис. 3-4. К расчету потерь энергии в конденсаторе.

Для рассматриваемого случая

$$h(t) = \frac{1}{rk} e^{-\frac{t}{\theta_k}}; \quad u_*(0) = 0;$$

$$u'(\tau) = \left(\frac{U_{\text{макс}}}{\tau_\Phi} \tau \right)' = \frac{U_{\text{макс}}}{\tau_\Phi};$$

$$h(t - \tau) = \frac{1}{rk} e^{-\frac{t - \tau}{\theta_k}}.$$

Для промежутка времени $0 < t < \tau_\Phi$ имеем:

$$i_1(t) = \int_0^t \frac{U_{\text{макс}}}{rk\tau_\Phi} e^{-\frac{t - \tau}{\theta_k}} d\tau = \frac{CkU_{\text{макс}}}{\tau_\Phi} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_k}} \right). \quad (3-9)$$

Для $\tau_{\Phi} < t < \tau_{\Pi} - \tau_{\Sigma}$

$$i_2(t) = i_1(t) - i_1(t - \tau_{\Phi}) = \frac{CkU_{\max}}{\tau_{\Phi}} \left(e^{\frac{\tau_{\Phi}}{\theta_k}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\theta_k}}. \quad (3-10)$$

Для $\tau_{\Pi} - \tau_{\Sigma} < t < \tau_{\Pi}$

$$\begin{aligned} i_3(t) &= i_1(t) - i_1(t - \tau_{\Phi}) - i_1(t - \tau_{\Pi} + \tau_{\Sigma}) = \\ &= CkU_{\max} \left(\frac{e^{\frac{\tau_{\Phi}}{\theta_k}} - 1}{\tau_{\Phi}} + \frac{e^{\frac{\tau_{\Pi} - \tau_{\Sigma}}{\theta_k}}}{\tau_{\Sigma}} \right) e^{-\frac{t}{\theta_k}} - \frac{CkU_{\max}}{\tau_{\Sigma}}. \end{aligned} \quad (3-11)$$

Для $\tau_{\Pi} < t < T_{\Pi}$

$$\begin{aligned} i_4(t) &= i_1(t) - i_1(t - \tau_{\Phi}) - i_1(t - \tau_{\Pi} + \tau_{\Sigma}) + \\ &+ i_1(t - \tau_{\Pi}) = Ae^{-\frac{t}{\theta_k}}, \end{aligned} \quad (3-11a)$$

где

$$A = CkU_{\max} \left(\frac{e^{\frac{\tau_{\Phi}}{\theta_k}} - 1}{\tau_{\Phi}} + \frac{e^{\frac{\tau_{\Pi} - \tau_{\Sigma}}{\theta_k}} - e^{-\frac{\tau_{\Pi}}{\theta_k}}}{\tau_{\Sigma}} \right).$$

Аналогичным путем можно определить ток в установившемся режиме, т. е. когда действует $(n+1)$ -й период напряжения, где $n \rightarrow \infty$.

Опуская промежуточные вычисления, запишем выражения для тока в установившемся режиме, соответствующем четырем отрезкам времени.

Для $0 < t^* < \tau_{\Phi}$

$$i_I(t) = \frac{A}{e^{\tau_{\Pi}/\theta_k} - 1} e^{-t^*/\theta_k} + \frac{CkU_{\max}}{\tau_{\Phi}} (1 - e^{-t^*/\theta_k}). \quad (3-12)$$

Для $\tau_{\Phi} < t^* < \tau_{\Pi} - \tau_{\Sigma}$

$$i_{II}(t) = \frac{A}{e^{\tau_{\Pi}/\theta_k} - 1} e^{-t^*/\theta_k} + \frac{CkU_{\max}}{\tau_{\Phi}} (e^{\tau_{\Phi}/\theta_k} - 1) e^{-t^*/\theta_k}. \quad (3-13)$$

Для $\tau_{\Pi} - \tau_{\Sigma} < t^* < \tau_{\Pi}$

$$\begin{aligned} i_{III}(t) &= \frac{A}{e^{\tau_{\Pi}/\theta_k} - 1} e^{-t^*/\theta_k} + CkU_{\max} \left(\frac{e^{\tau_{\Phi}/\theta_k} - 1}{\tau_{\Phi}} + \right. \\ &\left. + \frac{e^{(\tau_{\Pi} - \tau_{\Sigma})/\theta_k}}{\tau_{\Sigma}} \right) e^{-t^*/\theta_k} - \frac{CkU_{\max}}{\tau_{\Sigma}}. \end{aligned} \quad (3-14)$$

Для $\tau_n < t < T_n$

$$i_{IV}(t) = A \frac{e^{T_n/\theta_k}}{e^{T_n/\theta_k} - 1} e^{-t^*/\theta_k}, \quad (3-15)$$

где $t^* = t - nT_n$ — время, отсчитываемое от начала действия $(n+1)$ -го периода напряжения.

Потери энергии в установившемся режиме можно определить из соотношения

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{1}{T_n} \int_0^{\tau_n} U(t^*) i(t^*) dt^* = \\ &= \frac{1}{T_n} \left[\int_0^{\tau_\Phi} \frac{U_{\max}}{\tau_\Phi} t^* i_I(t^*) dt^* + \int_{\tau_\Phi}^{\tau_n - \tau_c} U_{\max} i_{II}(t^*) dt^* + \right. \\ &\quad \left. + \int_{\tau_n - \tau_c}^{\tau_n} \frac{U_{\max}(\tau_n - t^*)}{\tau_c} i_{III}(t^*) dt^* \right]. \end{aligned} \quad (3-16)$$

Подставив (3-12), (3-13), (3-14) и (3-6) в (3-16) и произведя вычисления и преобразования, получим:

$$\begin{aligned} P_{nk} &= \frac{U_{\max}^2 C_k \theta_k}{T_n \tau_\Phi \tau_c} \times \\ &\times \left\{ \frac{\tau_\Phi \tau_c \theta_k [e^{\tau_n/\theta_k} (e^{-\tau_\Phi/\theta_k} + e^{-\tau_c/\theta_k} - e^{-(\tau_\Phi + \tau_c)/\theta_k} - 1)]}{e^{T_n/\theta_k} - 1} + \right. \\ &+ \frac{\tau_\Phi \tau_c \theta_k e^{(T_n - \tau_n)/\theta_k} [(e^{\tau_\Phi/\theta_k} + e^{\tau_c/\theta_k} - e^{(\tau_\Phi + \tau_c)/\theta_k} - 1)]}{e^{T_n/\theta_k} - 1} + \\ &\quad + \frac{\theta_k \tau_c^2 [e^{T_n/\theta_k} (e^{-\tau_\Phi/\theta_k} - 1) + e^{\tau_\Phi/\theta_k} - 1]}{e^{T_n/\theta_k} - 1} + \\ &\quad \left. + \frac{\theta_k \tau_\Phi^2 [e^{T_n/\theta_k} (e^{-\tau_c/\theta_k} - 1) + e^{\tau_c/\theta_k} - 1]}{e^{T_n/\theta_k} - 1} + (\tau_\Phi \tau_c^2 + \tau_c^2 \tau_\Phi) \right\}. \end{aligned} \quad (3-17)$$

Учитывая (3-5), получим:

$$\begin{aligned} N_k &= \frac{P_{nk} T_n}{U_{\max}^2 C_k} = \frac{1}{e^{T_n/\theta_k} - 1} \left\{ \frac{\theta_k}{\tau_\Phi \tau_c} [e^{\tau_n/\theta_k} (e^{-\tau_\Phi/\theta_k} + \right. \\ &\quad \left. + e^{-\tau_c/\theta_k} - e^{-(\tau_\Phi + \tau_c)/\theta_k} - 1) + e^{(T_n - \tau_n)/\theta_k} (e^{\tau_\Phi/\theta_k} + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + e^{\tau_c/\theta_k} - e^{(\tau_\phi + \tau_c)/\theta_k} - 1) + \frac{\theta_k^2}{\tau_c^2} [e^{T_n/\theta_k} (e^{-\tau_\phi/\theta_k} - 1) + \\
& + e^{\tau_\phi/\theta_k} - 1] + \frac{\theta_k^2}{\tau_c^2} [e^{T_n/\theta_k} (e^{-\tau_c/\theta_k} - 1) + e^{\tau_c/\theta_k} - 1] + \\
& + (e^{T_n/\theta_k} - 1) \frac{\theta_k (\tau_\phi + \tau_c)}{\tau_\phi \tau_c} \}. \quad (3-18)
\end{aligned}$$

Аналогичным путем могут быть получены выражения для расчета коэффициента N_k для других форм напряжения. В табл. 3-2 приведены выражения N_k для ряда наиболее распространенных форм напряжения [23].

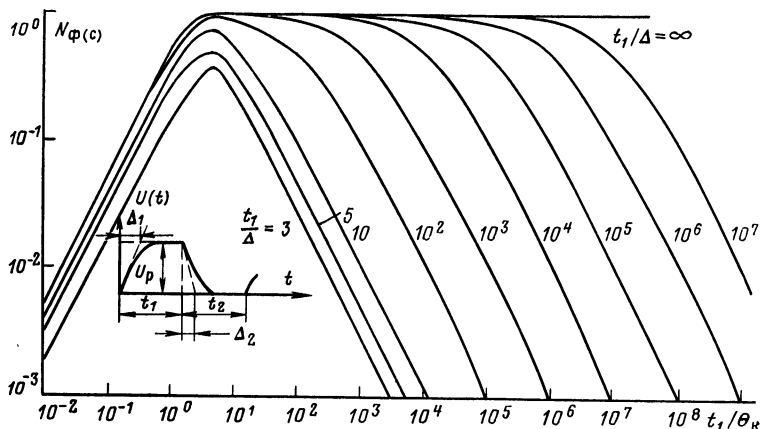


Рис. 3-5. Зависимость $N_k = \varphi \left(\frac{t_1(s)}{\theta_k} \right)$ при $\frac{t_1(s)}{\tau_\phi(c)} = \text{const}$ для релаксатора $r_k - C_k$ при воздействии на него несинусоидального напряжения с экспоненциальным законом нарастания и спада.

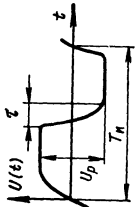
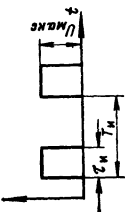
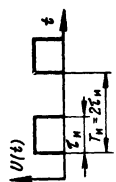
Заметим, что при τ_ϕ и $\tau_c \rightarrow 0$ формулы пп. 1, 5 табл. 3-2 преобразуются в формулу п. 3 этой же таблицы, соответствующую гипотетическому случаю, когда внешние цепи не имеют потерь. Соответственно формулы пп. 2, 7, 11 преобразуются в формулу п. 4 табл. 3-2.

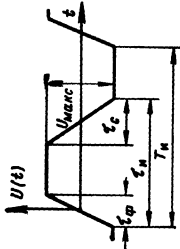
Для упрощения расчетов выражения по пп. 2, 7 и 11 табл. 3-2 представлены графически соответственно на рис. 3-5, 3-6, 3-7.

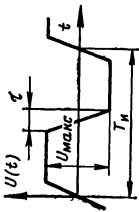
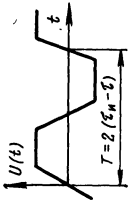
С помощью графиков легко определяются коэффициенты N_k для различных соотношений параметров напряжения и релаксатора.

Формулы для расчета коэффициента N_K

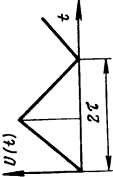
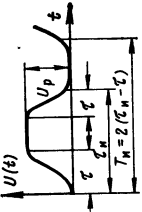
Форма напряжения	Эпоха напряжения на конденсаторе	Формула для расчета коэффициента N_K
1. Близка к прямоугольной с экспоненциальным законом изменения фронта и спада напряжения, имеющих постоянные времени Δ_1 и Δ_2, причем $\tau_{\Phi} \approx 3\Delta_1$; $\tau_c \approx 3\Delta_2$		$N_K = \frac{3\theta_K e^{\frac{\tau_n - \tau_c}{\theta_K}}}{\frac{T_n}{\theta_K} - 1} \left(\frac{e^{\frac{\tau_n - \tau_n + \tau_c}{\theta_K}}}{3\theta_K - \tau_{\Phi}} - \frac{1}{3\theta_K - \tau_c} \right) \times$ $\times \left(1 - e^{-\frac{\tau_n - \tau_c}{\theta_K}} - \frac{\tau_{\Phi}}{3\theta_K + \tau_{\Phi}} \right) +$ $+ \frac{\frac{T_n - \tau_n + \tau_c}{\theta_K}}{3\theta_K \tau_c e^{\frac{T_n}{\theta_K}} (e^{\frac{T_n}{\theta_K}} - 1)} \left(\frac{1}{3\theta_K - \tau_{\Phi}} - \frac{e^{\frac{\tau_n - \tau_c}{\theta_K}}}{3\theta_K - \tau_c} \right) +$ $+ \frac{3\theta_K (\tau_c - \tau_{\Phi})}{2 (3\theta_K - \tau_{\Phi}) (3\theta_K - \tau_c)}$

Форма напряжения	Экюра напряжения на конденсаторе	Формула для расчета коэффициента N_K
2. Та же, что и в предыдущем случае, но $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$; $\tau_\Phi = \tau_c = \tau = 3\Delta$; $T_H = 2(\tau_H - \tau)$		$N_K = \frac{\frac{T_H}{2\theta_K}}{3\theta_K e^{\left(\frac{T_H}{2\theta_K} + 1\right)}} \left(\frac{3\theta_K - \tau}{3\theta_K + \tau} - e^{\frac{T_H}{2\theta_K}} \right)$
3. Прямоугольная		$N_K = \frac{\left(\frac{T_H - \tau_H}{\theta_K} - 1 \right) \left(\frac{\tau_H}{\theta_K} - 1 \right)}{e^{\frac{T_H}{\theta_K}} - 1}$
4. Прямоугольная, но $T_H = 2\tau_H$		$N_K = \frac{\frac{\tau_H}{\theta_K} - 1}{e^{\frac{\tau_H}{\theta_K}} - 1}$

Форма напряжения	Эпюра напряжения на конденсаторе	Формула для расчета коэффициента N_K
5. Трапецидальная		$N_K = \frac{T_n}{\tau_c^2 \Phi^2 c} e^{\frac{T_n}{\theta_K}} - 1 \left\{ \left[e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} \left(-\frac{\tau_\Phi}{\theta_K} + e^{\frac{\tau_c}{\theta_K}} - \right. \right. \right.$ $\left. \left. - e^{-\frac{\tau_\Phi + \tau_c}{\theta_K}} - 1 \right) + e^{\frac{T_n - \tau_n}{\theta_K}} \left(\frac{\tau_\Phi}{\theta_K} + e^{\frac{\tau_c}{\theta_K}} - \right. \right.$ $\left. \left. - e^{\frac{\tau_\Phi + \tau_c}{\theta_K}} - 1 \right) \right] \tau_\Phi \tau_c \theta_K + \theta_K \tau_c^2 \left[e^{\frac{T_n}{\theta_K}} \left(-\frac{\tau_\Phi}{\theta_K} - 1 \right) + \right.$ $\left. + e^{\frac{\tau_\Phi}{\theta_K}} - 1 \right] + \theta_K \tau_c^2 \Phi \left[e^{\frac{T_n}{\theta_K}} \left(-\frac{\tau_c}{\theta_K} - 1 \right) + e^{\frac{\tau_c}{\theta_K}} - 1 \right] +$ $\left. + \tau_\Phi \tau_c \left(e^{\frac{T_n}{\theta_K}} - 1 \right) (\tau_\Phi + \tau_c) \right\}$

Форма напряжения	Эпюра напряжения на конденсаторе	Формула для расчета коэффициента N_K
6. Трапецидальная, но $\tau_\Phi = \tau_c = \tau$		$N_K = \frac{\theta_K}{\tau^2} \left\{ \theta_K \left[\left(e^{-\frac{\tau_\Phi}{\theta_K}} - 1 \right) \left(2e^{\frac{T_H}{\theta_K}} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + e^{\frac{\tau_H}{\theta_K}} - e \right) \frac{\tau_H - \tau_\Phi}{\theta_K} \right] + \left(e^{\frac{\tau_\Phi}{\theta_K}} - 1 \right) \left(2 + e^{\frac{T_H - \tau_H}{\theta_K}} - \right. \right. \\ \left. \left. - e^{\frac{T_H - \tau_H + \tau_\Phi}{\theta_K}} \right) \right] + 2\tau \left(e^{\frac{T_H}{\theta_K}} - 1 \right) \right\} / \left(e^{\frac{T_H}{\theta_K}} - 1 \right)$
7. Трапецидальная, но $\tau_\Phi = \tau_c = \tau$, $T_H = 2(\tau_H - \tau)$		$N_K = \frac{2\theta_K}{\tau^2} \left[\tau + \frac{\theta_K \left(e^{\frac{\tau_H - 2\tau}{\theta_K}} - e^{\frac{\tau_H - \tau}{\theta_K}} - e^{\frac{\tau}{\theta_K}} + 1 \right)}{e^{\frac{\tau_H - \tau}{\theta_K}} - e^{\frac{\tau}{\theta_K}} + 1} \right]$

Форма напряжения	Эпюра напряжения на конденсаторе	Формула для расчета коэффициента N_K
8. Пилообразная		$N_K = \frac{\theta_K}{\tau^2 \phi \tau^2 c \left(e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} - 1 \right)} \left\{ \tau \phi \tau c \theta_K \left[\left(e^{\frac{\tau \phi}{\theta_K}} + e^{\frac{\tau c}{\theta_K}} - \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - e^{\frac{\tau \phi + \tau c}{\theta_K}} - 1 \right) + e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} \left(- \frac{\tau \phi}{\theta_K} - \frac{\tau c}{\theta_K} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - e^{-\frac{\tau \phi + \tau c}{\theta_K}} - 1 \right) \right] + \theta_K \tau^2 c \left[e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} \left(- \frac{\tau \phi}{\theta_K} - 1 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + e^{\frac{\tau \phi}{\theta_K}} - 1 \right] + \theta_K \tau^2 \phi \left[e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} \left(- \frac{\tau c}{\theta_K} - 1 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + e^{\frac{\tau c}{\theta_K}} - 1 \right] + (e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} - 1) \tau \phi \tau c (\tau \phi + \tau c) \right\} \\ N_K = \frac{\theta_K \tau_n}{\tau^2 \phi \tau^2 c \left(e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} - 1 \right)} \times \\ \times \left[\theta_K \tau_n \left(e^{\frac{\tau c}{\theta_K}} - 1 \right) \left(1 - e^{\frac{\tau \phi}{\theta_K}} \right) + \tau \phi \tau c \left(e^{\frac{\tau_n}{\theta_K}} - 1 \right) \right] $
9. Пилообразная, но $T_n - \tau_n = 0$; или $T_n = \tau_n$		

Форма напряжений	Эпюра напряжения на конденсаторе	Формула для расчета коэффициента N_K
10. Треугольная, $\tau_{\phi} = \tau_c = \tau;$ $\tau_H = 2\tau = T_H$		$N_K = \frac{2\theta_K}{\tau^2} \left[\tau - \frac{2\theta_K}{e^{\frac{\tau}{\theta_K}} - 1} \frac{\frac{\tau}{\theta_K}}{e^{\frac{\tau}{\theta_K}} + 1} \right]$
11. Близка к прямоугольной с косинусо-дальним законом изменения фронта и спада		$N_K = \frac{1}{2 \left(1 + \frac{\tau^2}{\pi^2 \theta_K^2} \right)} \left[\frac{1}{1 + \frac{\tau^2}{\pi^2 \theta_K^2}} \times \left(\frac{\tau}{e^{\frac{\tau}{\theta_K}} + 1} \right) \left(e^{\frac{\tau_H - 2\tau}{\theta_K}} - 1 \right) \frac{\tau}{e^{\frac{\tau_H - \tau}{\theta_K}} + 1} + \frac{2\theta_K}{e^{\frac{\tau_H - \tau}{\theta_K}} + 1} \right]$

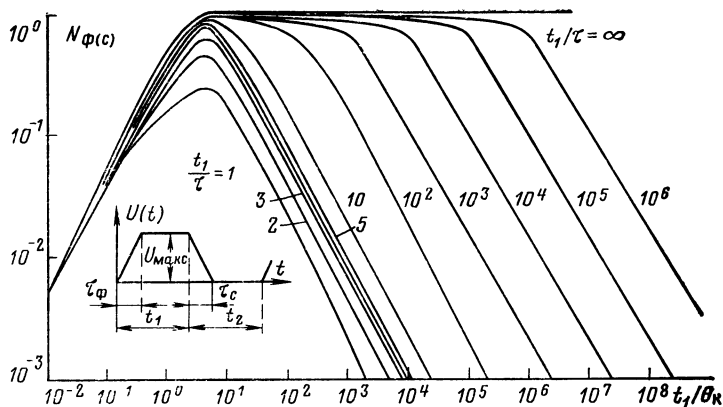


Рис. 3-6. Зависимость $N_{\Phi(c)} = \varphi\left(\frac{t_1(2)}{\theta_K}\right)$ при $\left(\frac{t_1(2)}{\tau_{\Phi(c)}}\right) = \text{const}$ для релаксатора $r_K - C_K$ при воздействии на него несинусоидального напряжения с линейным законом нарастания и спадания.

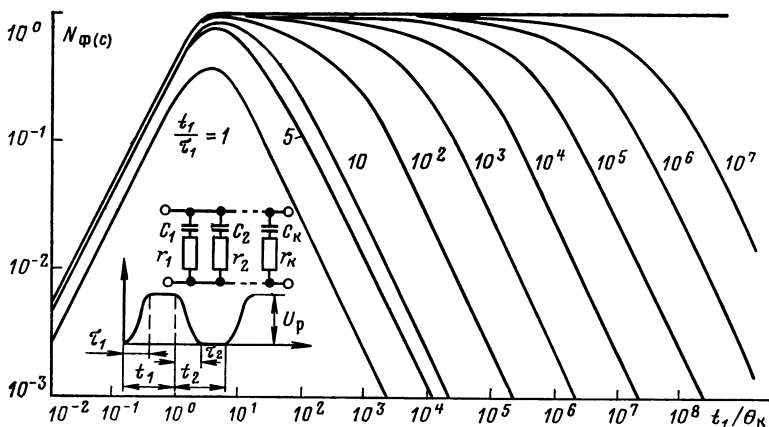


Рис. 3-7. Зависимость $N_K = \varphi\left(\frac{t_1(2)}{\theta_K}\right)$ при $\left(\frac{t_1(2)}{\tau_{1(2)}}\right) = \text{const}$ для релаксатора $r_K - C_K$ при воздействии на него несинусоидального напряжения с косинусоидальным (синусоидальным) законом нарастания и спадания напряжения.

Рассмотрим пример 1.

Дано: органический диэлектрик полиэтилентерефталат (ПЭТФ) при температуре $T_{\text{окр}}=20^{\circ}\text{C}$ имеет следующие параметры релаксационных цепей (табл. 3-3):

Таблица 3-3

Параметры θ_k , α_k органических диэлектриков при температуре окружающей среды $T_{\text{окр}}=20^{\circ}\text{C}$

Наименование диэлектрика	Параметры θ_k , с			
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
Конденсаторная бумага				
КОН-II с неполярной пропиткой (КОН-II с н.п) . .	$1,23 \cdot 10^{-1}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$8,95 \cdot 10^{-6}$	$1,42 \cdot 10^{-7}$
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$	—
Поликарбонат (ПК)	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,54 \cdot 10^{-6}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	—
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	$3,36 \cdot 10^{-4}$	$3,54 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	—

Продолжение табл. 3-3

Наименование диэлектрика	Параметры θ_k , с			
	α_1	α_2	α_3	α_4
Конденсаторная бумага				
КОН-II с неполярной пропиткой (КОН-II с н.п) . .	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$4,45 \cdot 10^{-2}$	—
Поликарбонат (ПК)	$2 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	—
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	$6,28 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	—

$$\theta_1 = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad \theta_2 = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \quad \theta_3 = 1,27 \cdot 10^{-7} \text{ с},$$

$$\alpha_1 = 8,7 \cdot 10^{-3}, \quad \alpha_2 = 2,54 \cdot 10^{-2}, \quad \alpha_3 = 4,45 \cdot 10^{-2}.$$

При этом задано, что $\tau_{\text{ф}} = \tau_{\text{с}} = \tau = 2 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $T_{\text{н}} = 2(\tau_{\text{н}} - \tau) = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$,

$$N = \sum_1^n \alpha_k N_k.$$

Требуется определить коэффициент N для случая, когда на диэлектрик конденсатора воздействует периодическое напряжение, близкое по форме к прямоугольному, имеющее фронт и спад, изменяющиеся по линейному закону (см. табл. 3-2, п. 7).

Для определения N_k воспользуемся графиком, приведенным на рис. 3-6.

Предварительно находим:

$$\frac{t_1}{\theta_1} = \frac{\tau_n - \tau}{\theta_1} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{6,7 \cdot 10^{-4}} = 3; \quad \frac{t_1}{\theta_2} = 1,86 \cdot 10^2;$$

$$\frac{t_1}{\theta_3} = 1,57 \cdot 10^4; \quad \frac{t_1}{\tau_{\Phi} (c)} = \frac{\tau_n - \tau}{\tau_{\Phi} (c)} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-5}} = 10^3.$$

По этим данным из рис. 3-6 определяем:

$$N_1 = 0,83; \quad N_2 = 0,84; \quad N_3 = 0,08.$$

Наконец, $N = \sum_1^n N_k a_k = N_1 a_1 + N_2 a_2 + N_3 a_3 = 8,3 \times$
 $\times 10^{-1} \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} + 8,4 \cdot 10^{-1} \cdot 2,54 \cdot 10^{-2} + 8 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 45 \cdot 10^{-2} =$
 $= 7,2 \cdot 10^{-3} + 2,05 \cdot 10^{-2} + 3,55 \cdot 10^{-3} = 3,12 \cdot 10^{-2}.$

Отметим также, что этими же графиками можно воспользоваться при расчете N_k и $P_{пк}$ и в других случаях, приведенных в табл. 3-2. Выражение $P_{пк}$ здесь будет представлено в виде

$$P_{пк} = \frac{U_p^2 C_k}{4} \left[\frac{N_{\Phi k}}{\tau_n - \tau_{\Phi}} + \frac{N_{с k}}{T_n - \tau_n + \tau_c} \right], \quad (3-19)$$

где $N_{\Phi k}$ и $N_{с k}$ — коэффициенты, характеризующие потери энергии в релаксационной цепочке $r_k - C_k$ соответственно на временных участках напряжения $\tau_n - \tau_{\Phi}$ и $T_n - \tau_n + \tau_c$.

Графики, приведенные на рис. 3-5, используются в случаях выражений (пп. 1, 2) табл. 3-2. Соответственно для случаев выражений (пп. 5—10) коэффициент $N_{\Phi k}$ и $N_{с k}$ определяют с помощью графиков рис. 3-6 и, наконец, для случая выражения (11) пригодны графики рис. 3-7.

Нетрудно заметить, что для прямоугольных форм напряжений [случай выражения (пп. 3, 4) табл. 3-2] могут быть использованы графики, изображенные на любом из рис. 3-5, 3-6, 3-7. При этом полагается, что $\frac{t_{1(2)}}{\tau_{\Phi} (c)} = \rightarrow \infty.$

Рассмотрим теперь способы нахождения параметров переходной проводимости конденсатора (конденсатор-

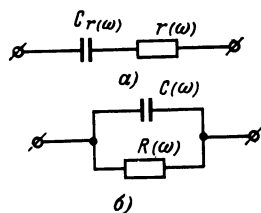


Рис. 3-8. Схемы замещения конденсатора.

а — последовательная; б — параллельная.

ного диэлектрика) $r_k, C_k, \theta_k, \alpha_k$. Эти параметры могут быть определены графоаналитическим методом по частотным зависимостям C [3] и $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора [20, 23].

Способ базируется на следующих предположениях.

На рис. 3-8 представлены последовательная и параллельная схемы замещения конденсатора, где

$$C(\omega) = \frac{C_r(\omega)}{1 + \omega^2 C_r^2(\omega) r^2(\omega)};$$

$$R(\omega) = r(\omega) \left[1 + \frac{1}{\omega^2 C_r^2(\omega) r^2(\omega)} \right]. \quad (3-20)$$

Для параллельной схемы (рис. 3-8) выражение для комплексной проводимости $y(j\omega)$ имеет вид:

$$y(j\omega) = \frac{1}{R(\omega)} - j\omega C(\omega). \quad (3-21)$$

Тогда переходная проводимость конденсатора может быть определена из следующих соотношений:

$$h(t) = h(0) - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty C(\omega) \cos \omega t d\omega; \quad (3-22)$$

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{1}{R(\omega)} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega. \quad (3-23)$$

Для единичного релаксатора $r_k - C_k$ с постоянной времени θ_k область частот, в которой имеет место спадание величины $C(\omega)$ или рост $\frac{1}{R(\omega)}$, определяется из выражений

$$C_k(\omega) = \frac{C_{rk}}{1 + \omega^2 C_r^2 r^2}; \quad (3-24)$$

$$\frac{1}{R_k(\omega)} = \frac{1}{r_k} \frac{\omega^2 C_r^2 r^2}{(1 + \omega^2 C_r^2 r^2)}. \quad (3-25)$$

Практически изменение $C_k(\omega)$ или $\frac{1}{R_k(\omega)}$ ограничивается диапазоном $0,1 \leq \omega \theta \leq 10$.

Для этого случая, подставляя (3-24) в (3-22) и полагая $h(0) = 0$ или подставляя (3-25) в (3-23), получим:

$$h(t) = \frac{1}{r_k} e^{-\frac{t}{\theta_k}}.$$

Допустим теперь, что имеются экспериментальные зависимости $C(\omega)$ или $\frac{1}{R(\omega)}$. Представим их в виде конечных сумм таких составляющих, каждая из которых соответствовала бы отдельному экспоненциальному члену переходной проводимости $h(t)$:

$$C(\omega) = \sum_1^n \frac{C_{rk}}{1 + \omega^2 \theta_k^2} = \sum_1^n C_k(\omega);$$

$$\frac{1}{R(\omega)} = \sum_1^n \frac{1}{r_k} \frac{\theta_k^2 \omega^2}{(1 + \omega^2 \theta_k^2)} = \sum_1^n \frac{1}{R_k(\omega)}.$$

С учетом того, что релаксационный процесс, характеризующийся постоянной времени θ_k , соответствует спаду $C(\omega)$ или возрастанию $\frac{1}{R(\omega)}$ в диапазоне частот $0,1 \leq \omega \theta_k \leq 10$, можно приближенно считать, что каждый участок зависимостей $C(\omega)$ и $\frac{1}{R(\omega)}$, приходящийся на изменение частоты на два порядка, соответствует определенной экспоненциальной составляющей $h(t)$.

Тогда без учета сопротивления изоляции конденсатора получим выражения $h(t)$ в виде

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \sum_1^n \frac{C_{rk}}{1 + \omega^2 \theta_k^2} \frac{\cos \omega t}{\omega} d\omega = \sum_1^n \frac{1}{r_k} e^{-t/\theta_k}; \quad (3-26)$$

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \sum_1^n \frac{1}{r_k} \frac{\theta_k^2 \omega^2}{(1 + \omega^2 \theta_k^2)} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega = \sum_1^n \frac{1}{r_k} e^{-t/\theta_k}.$$

(3-27)

Определение параметров C_{rk} , $\frac{1}{r_k}$ и θ_k целесообразно проводить графически. Для этого весь частотный диапазон, в котором экспериментально определены зависимости $C(\omega)$ или $\frac{1}{R(\omega)}$, разбиваем на n поддиапазонов, внутри которых частота изменяется на два порядка (рис. 3-9, 3-10). Величины C_{rk} или $\frac{1}{r_k}$ определяются как разности

значения $C(\omega)$ или $1/R(\omega)$ на границах соответствующего диапазона. Постоянная времени θ_k может быть определена из условия уменьшения величины $C(\omega)$ или $1/R(\omega)$ до значения $C_{rk}/2$ или $1/2r_k$, так как $\omega^2\theta_k^2=1$, где ω — круговая частота, при которой величины $C_k(\omega)$ и $1/R_k(\omega)$ уменьшаются в 2 раза по сравнению с максимальным значением.

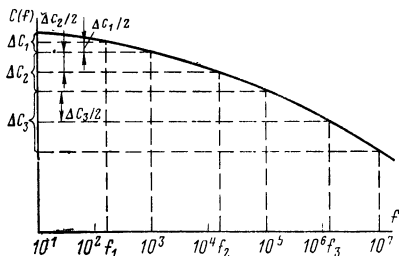


Рис. 3-9. К расчету параметров переходной проводимости конденсатора по частотной зависимости его емкости

$$\theta_1 = \frac{1}{2\pi f_1}; \theta_2 = \frac{1}{2\pi f_2}; \theta_3 = \frac{1}{2\pi f_3};$$

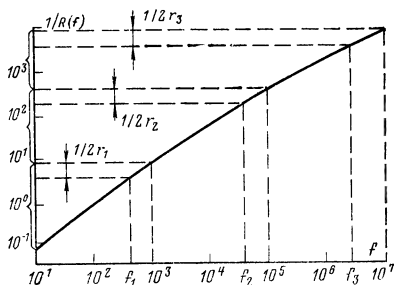
$$\alpha_1 = \frac{\Delta C_1}{C_{\text{НОМ}}}; \alpha_2 = \frac{\Delta C_2}{C_{\text{НОМ}}}; \alpha_3 = \frac{\Delta C_3}{C_{\text{НОМ}}}.$$

Анализ выражений коэффициентов потерь энергии для единичного релаксатора (табл. 3-2) показывает, что при оценке числа экспоненциальных составляющих, которые должны быть учтены, необходимо сравнивать их

Рис. 3-10. К расчету параметров переходной проводимости конденсатора по частотной зависимости его проводимости.

$$\theta_1 = \frac{1}{2\pi f_1}; \theta_2 = \frac{1}{2\pi f_2}; \theta_3 = \frac{1}{2\pi f_3}$$

$$C_1 = \theta_1 \frac{1}{r_1}; C_2 = \theta_2 \frac{1}{r_2}; C_3 = \theta_3 \frac{1}{r_3}.$$



постоянные времени с параметрами импульсного напряжения. При учете релаксационных цепочек, имеющих малую постоянную времени, достаточно остановиться на такой, которая имеет $\theta_{\text{мин}}$, соизмеримую с длительностью фронта или спада импульса напряжения (в зависимости от того, какой из них имеет меньшую длительность). При учете составляющих, имеющих большую по-

стоянную времени θ_k , достаточно остановиться на члене, который имеет $\theta_{\max}$, соизмеримую с периодом следования импульсов [22]. Практика показывает, что в большинстве случаев достаточным оказывается учет трех — пяти членов. При этом погрешность расчета не превышает 15—20%.

Таблица 3-4

Параметры θ_k , α_k полярных органических диэлектриков при температурах окружающей среды $T_{\text{окр}}=100^\circ\text{C}$ и $T_{\text{окр}}=125^\circ\text{C}$

Наименование диэлектрика	Параметры θ_k , с			
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
Конденсаторная бумага КОН-II с н. п. при $T_{\text{окр}}=100^\circ\text{C}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	10^{-3}	10^{-5}	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) при $T_{\text{скр}}=125^\circ\text{C}$	10^{-3}	$9,5 \cdot 10^{-6}$	$4,35 \cdot 10^{-7}$	—

Продолжение табл. 3-4

Наименование диэлектрика	Параметры α_k			
	α_1	α_2	α_3	α_4
Конденсаторная бумага КОН-II с н. п. при $T_{\text{окр}}=100^\circ\text{C}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) при $T_{\text{окр}}=125^\circ\text{C}$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	—

В табл. 3-3, 3-4 приведены параметры θ_k , α_k для ряда диэлектриков, которые используются при конструировании в современном конденсаторостроении. Данные получены путем графоаналитической обработки частотных зависимостей активной и реактивной составляющих соответствующих диэлектриков в диапазоне частот от 10 Гц до 10^7 Гц. Для бумажного диэлектрика диапазон частот составлял от 0,1 Гц до 10^7 Гц. По этим данным с помощью формул, приведенных в табл. 3-2, можно произвести расчет зависимостей N_k и $N = \sum \alpha_k N_k$ от параметров импульсов напряжения требуемой формы для конкретных типов диэлектриков.

В табл. 3-5, 3-6 приведены для ряда диэлектриков такие зависимости, расчет которых выполнен по формуле, приведенной в п. 2 табл. 3-2.

$\tau_{\Phi}(\tau_0)$, с	Значения $\tau_{\Phi} - \tau_0(T_{\Phi} - T_{\Phi} + \tau_0)$, с																	
	$5 \cdot 10^{-3}$						10^{-3}						$5 \cdot 10^{-4}$					
	КОН-II с н. п.	ПЭТФ ³	ПК ³	ПТФЭ ⁴	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	ПК	ПТФЭ	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	ПК	ПТФЭ	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	ПК	ПТФЭ		
10^{-6}	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$						
10^{-5}	$4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$						
10^{-4}	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$						
10^{-3}	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—						

Продолжение табл. 3-5

$\tau_{\Phi}(\tau_0)$, с	Значения $\tau_H - \tau_{\Phi}(T_H - \tau_M + \tau_0)$, с											
	10^{-4}				10^{-5}				10^{-6}			
	КОН-II с н. п	ПЭТФ	ПК	ПТФЭ	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	ПК	ПТФЭ	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	ПК	ПТФЭ
10^{-3}	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
10^{-4}	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—	—
10^{-5}	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$1,5 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—	—	—	—	—

¹ КОН-II с н. п. — конденсаторная бумага с неполярной пропиткой.

2. ПЭТФ — полиэтилентерефталат.

а ПТФЭ — политетрафторэтилен (фторопласт-4).

* ПК.— поликарбонат.

Таблица 3-6

Зависимости $N_{\Phi} = \varphi(\tau_{\Phi}, \tau_{\text{н}} - \tau_{\Phi})$ или $N_{\Sigma} = \varphi(\tau_{\Sigma}, T_{\text{н}} - \tau_{\text{н}} + \tau_{\Sigma})$
 для бумаги КОН-II с неполярной пропиткой при
 $T_{\text{окр}} = 100^{\circ}\text{C}$ и ПЭТФ при $T_{\text{окр}} = 125^{\circ}\text{C}$

$\tau_{\Phi}(\tau_{\Sigma}),$ с	Значения $\tau_{\text{н}} - \tau_{\Phi}(T_{\text{н}} - \tau_{\text{н}} + \tau_{\Sigma}),$ с					
	$5 \cdot 10^{-3}$		10^{-3}		$5 \cdot 10^{-4}$	
	КОН-II с н. п.	ПЭТФ ^а	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	КОН-II с н. п.	ПЭТФ
10^{-6}	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$
10^{-5}	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$
10^{-4}	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
10^{-3}	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	—	—

Продолжение табл. 3-6

$\tau_{\Phi}(\tau_{\Sigma}),$ с	Значения $\tau_{\text{н}} - \tau_{\Phi}(T_{\text{н}} - \tau_{\text{н}} + \tau_{\Sigma}),$ с					
	10^{-4}		10^{-5}		10^{-6}	
	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	КОН-II с н. п.	ПЭТФ	КОН-II с н. п.	ПЭТФ
10^{-6}	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}
10^{-5}	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	—	—
10^{-4}	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—
10^{-3}	—	—	—	—	—	—

^аКОН-II с н. п. — конденсаторная бумага с неполярной пропиткой.

^аПЭТФ — полиэтилентерефталат.

Отметим, что в ряде случаев фронт и спад напряжения изменяются во времени по закону, отличному от экспоненциального, например по линейному или косинусоидальному закону. Однако анализ показывает, что при всех параметрах импульсов, равных между собой, величина коэффициента N_k в самом наихудшем случае в 1,5 раза выше у импульсов с экспоненциальным законом изменения фронта и спада по сравнению с N_k импульсов, имеющих линейный закон изменения фронта и спада.

Различие в N_k с импульсами, имеющими косинусоидальный закон изменения фронта и спада, еще меньше. Естественно, что для $N = \sum \alpha_k N_k$ расхождение не превосходит полуторакратного значения и в большинстве случаев будет незначительным [23].

При известном значении коэффициента N из формулы (3-4) можно определить размах напряжения U_p , при котором потери энергии в конденсаторе не превзойдут заданного уровня $P_{\text{п.доп}}$:

$$U_p \leq \sqrt{\frac{P_{\text{п.доп}}}{C_{\text{ном}} F_{\text{и}} N}}. \quad (3-28)$$

Рассмотрим пример 2.

На конденсатор, выполненный на основе пленки полиэтилентерефталата, имеющий $C_{\text{ном}} = 1$ мкФ и $P_{\text{п.доп}} = 1$ Вт, действует трапецидальное напряжение с параметрами

$$\tau_{\text{ф}} = \tau_{\text{с}} = \tau = 10^{-6} \text{ с};$$

$$T_{\text{и}} = 2(\tau_{\text{и}} - \tau) = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

Требуется определить U_p , при которой потери энергии в конденсаторе при температуре окружающей среды $T_{\text{окр}} = 125^\circ\text{C}$ не превзойдут $P_{\text{п.доп}}$.

Из табл. 3-6 для ПЭТФ при $\tau_{\text{и}} - \tau = 10^{-4}$ с и $\tau = 10^{-6}$ с находим $N = 6,6 \cdot 10^{-2}$.

Подставляя теперь в формулу (3-28) $P_{\text{п}}$, $C_{\text{ном}}$ и $F_{\text{и}} = \frac{1}{T_{\text{и}}}$, находим $U_p \leq \sqrt{\frac{1}{10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 6,6 \cdot 10^{-2}}} = 55 \text{ В}$.

3-4. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Для конденсаторов с органическим диэлектриком, испытывающих воздействие переменного напряжения, основную роль в их электрическом старении могут играть частичные разряды, происходящие в газовых полостях или масляных прослойках. Следует отметить, что проблема связи срока службы органической изоляции с параметрами несинусоидального или импульсного напряжения при напряженностях поля, вызывающих частичные разряды, до сих пор изучена недостаточно.

На основе накопленных экспериментальных данных можно полагать, что при несинусоидальной форме кривой напряжения при ее размахе менее 500—600 В, частичные разряды в конденсаторах практически не развиваются и соответственно доля их влияния на электрическое старение конденсатора мала.

При размахе напряжения, превышающем 600 В, следует считаться с возможностью развития ионизационных процессов в конденсаторах. В этих случаях при конструировании конденсаторов на большие сроки службы, предназначенных для работы в импульсных режимах или с несинусоидальной формой кривой напряжения, обычно ориентируются на величину напряжения возникновения частичных разрядов, измеренного при синусоидальном токе частоты 50 Гц. При этом выбирают размах импульсного напряжения в 1,2—2 раза меньшим размаха напряжения начала ионизации, измеренного при синусоидальном токе частоты 50 Гц [24].

Влияние импульсных токов на работоспособность конденсаторов необходимо рассматривать с двух сторон: влияние действующего тока; влияние кратковременного импульса тока.

При периодической несинусоидальной нагрузке через конденсатор протекает ток с действующим значением I , которой рассеивает в armатуре конденсатора некоторую энергию. При использовании конденсатора в качестве коммутирующего элемента эффективный ток через него достигает, как правило, больших значений, что может привести к выходу конденсатора из строя.

Для оценки потерь в armатуре конденсатора учтем следующие соображения.

Во многих практических случаях диэлектрическая проницаемость рабочего диэлектрика конденсатора в широком диапазоне частот (10 — 10^7) Гц снижается незначительно, примерно на 15%, а $\operatorname{tg} \delta$ возрастает не более чем до 0,3. Тогда для расчета потерь в armатуре конденсатора можно воспользоваться простейшей эквивалентной схемой замещения конденсатора, представленной на рис. 3-8,а. При известном назначении тока I потери в armатуре определяются из соотношения

$$P_{\text{п.м}} = I^2 r_{\text{м}}, \quad (3-29)$$

где $r_{\text{м}}$ — сопротивление, эквивалентное потерям в armатуре конденсатора (в обкладках, выводах и пр.).

Практика показывает, что для большинства конденсаторов, за исключением конденсаторов с окисным диэлектриком, $\theta_{\text{м}} = C_{\text{н}} r_{\text{м}}$ такова, что выполняются условия $\theta_{\text{м}} \ll \tau_{\text{ф}}$ и $\theta_{\text{м}} \ll \tau_{\text{с}}$. В этом случае потери в armатуре конденсатора при несинусоидальном напряжении с экспоненциальным законом изменения фронта и спада опре-

деляются соотношением

$$P_{п.м} = \frac{1,5U_p^2 C_{н.м}}{T_{н}} \left(\frac{1}{\tau_{\Phi}} + \frac{1}{\tau_{с}} \right). \quad (3-30)$$

Для трапецидального, пилообразного и треугольного напряжений с линейными фронтами и спадом

$$P_{п.м} = \frac{U_p^2 C_{н.м}}{T_{н}} \left(\frac{1}{\tau_{\Phi}} + \frac{1}{\tau_{с}} \right). \quad (3-31)$$

Действующее значение тока, протекающего через конденсатор, соответственно будет равно:

$$I_s = 1,22U_p C_{н} \sqrt{\frac{\tau_{\Phi} + \tau_{с}}{T_{н} \tau_{\Phi} \tau_{с}}}; \quad (3-32)$$

$$I_{л} = U_p C_{н} \sqrt{\frac{\tau_{\Phi} + \tau_{с}}{T_{н} \tau_{\Phi} \tau_{с}}}. \quad (3-33)$$

При выборе типа обкладок конденсатора (металлизированных или фольговых) сечения соединительных шин от секции конденсатора к выводу и сечения самого вывода должно быть учтено, что конденсатор работает во многих случаях с большими действующими токами и его конструкция должна выдерживать необходимый ток. Естественно, при этом сохраняется требование, чтобы арматура конденсатора не приводила к существенному снижению его удельных характеристик.

Ток, протекающий через конденсатор, может быть импульсным и достигать сравнительно больших значений (до нескольких тысяч ампер). За время действия коротких импульсов тока тепловая энергия не успевает распространиться по всему объему конденсатора и передаться в окружающее пространство, что приводит к локальным перегревам. В результате перегревов могут произойти нарушение контакта обкладок с выводами, частичное выгорание слоя металлизации в конденсаторах с металлизированными обкладками и т. д. Такие перегревы возможны в местах с повышенным удельным сопротивлением и прежде всего в контактной области, для которой характерна и наибольшая плотность тока. Отсюда следует, что оценку допустимого значения импульсного тока в первую очередь необходимо производить именно для этой области.

Для конденсаторов с металлизированными обкладками опасность разрушения наиболее вероятна. Оценка

допустимого значения импульсного тока для них $I_{\text{макс}}$ может быть проведена с помощью следующих соотношений [25]:

$$I_{\text{макс}} = \Gamma \frac{C_{\text{ном}}}{\sqrt{\tau_{\text{и.э}}}}, \quad (3-34)$$

здесь $C_{\text{ном}}$ — номинальная емкость конденсатора, мкФ; $\tau_{\text{и.э}}$ — энергетическая длительность импульса тока, с, определяемая соотношением

$$\tau_{\text{и.э}} = \frac{1}{I_{\text{макс}}^2} \int_0^{\tau_{\text{и}}} i^2(t) dt;$$

$\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса тока; $I_{\text{макс}}$ — максимальное значение импульса тока; Γ — коэффициент, определяемый выражением

$$\Gamma = 698dV/\epsilon l, \quad (3-35)$$

где d — толщина рабочего диэлектрика, мкм; l — ширина обкладки, см; ϵ — диэлектрическая проницаемость рабочего диэлектрика; V — коэффициент, определяемый токовой характеристикой конденсатора ($\text{А} \cdot \text{с}^{1/2} \text{ см}^{-1}$), полученный на основе экспериментальных данных.

Значение коэффициента V зависит от конструкции контактного узла конденсатора, от вида металла, используемого для напыления обкладки (цинк, алюминий), от проводимости обкладки и т. д. Для предвари-

Таблица 3-7

Значения коэффициента V для конденсаторов с органическим диэлектриком и металлизированными обкладками

Тип конденсатора	Наименование рабочего диэлектрика	Наименование металла обкладки	Коэффициент V ($\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-1}$)
K76-2	Триацетат целлюлозы	Алюминий	$0,67 \cdot 10^{-4}$
K71-4	Полистирол	"	$1 \cdot 10^{-4}$
K77-5	Поликарбонат	"	$1,2 \cdot 10^{-4}$
МБМ	Конденсаторная бумага (КОН-II)+церезин	Цинк	$2,4 \cdot 10^{-4}$
K75-10	Конденсаторная бумага, полиэтилентерефталат+вазелиновое масло	"	$2,9 \cdot 10^{-4}$
K73П-2	Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	"	2,5

тельных расчетов коэффициент B может быть принят равным $(1 \div 2) \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{см}^{-1}$.

Для конденсаторов отдельных типов с металлизированными обкладками коэффициент B колеблется в пределах, указанных в табл. 3-7.

3-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАНДАРТНЫХ УРОВНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК КОНДЕНСАТОРОВ

Современная техника выдвигает расширенные требования к конденсаторам как по видам электрической нагрузки (см. рис. 3-1), так и по диапазонам изменения параметров этих нагрузок при минимизации массогабаритных характеристик этих изделий.

Удовлетворить эти два требования, во многих случаях противоречивые, можно лишь при задании допустимых нагрузок для конкретных номиналов конденсаторов. В то же время форма описания допустимых нагрузок должна быть приемлемой для потребителя и поставщика конденсаторов.

Рассмотрим возможный вариант формы задания допустимых электрических нагрузок конденсаторов.

1. Устанавливаются допустимые значения положительных U_1 и отрицательных пиков U_2 переменного напряжения и допустимое значение пикового напряжения $U_{\text{пик}}$ на конденсаторе.

2. Устанавливается допустимый нагрев корпуса конденсаторов

$T_{\text{макс.к}}$ в функции от температуры окружающей среды. Эта зависимость может быть задана таблично или графически, как это показано на рис. 3-11.

3. Устанавливаются допустимые значения действующего тока для конденсаторов данного типа (данной конструкции).

В качестве примера в табл. 3-8 приведены допустимые эффективные токи для конденсаторов К75-10.

4. Устанавливаются для конденсаторов допустимые значения импульсного тока. Они могут быть заданы так, как это показано в табл. 3-9 и 3-10.

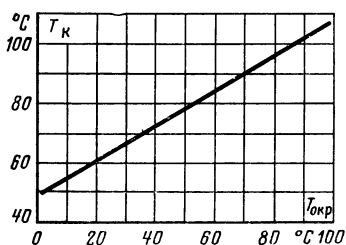


Рис. 3-11. Зависимость максимально допустимой температуры корпуса конденсатора К75-10 от температуры окружающей среды.

Ориентировочные данные допустимых значений токов конденсаторов К75-10

Емкость $C_{ном}$, мкФ	Напряжение $U_{ном}$, В	Диаметр D , мм	Длина L , мм	Ток I , А
1,5 2,2 3,3 4,7 6,8 10	250	28 32 28 32 38 48	55 55 95 95 95 95	4,5 4,5 4,5 6,0 8,0 12,0
0,47 0,68 1,0 1,5 2,2 3,3	500	28 32 30 38 40 48	65 65 95 95 115 115	4,5 5,0 5,0 8,0 8,5 12,0
0,15 0,22 0,33 0,47 0,68 1,0 1,5	750	26 30 34 34 40 48 50	65 65 65 95 95 95 115	4,0 4,5 6,0 6,0 8,5 12,0 13,0
0,15 0,22 0,33 0,47 0,68 1,0	1000	26 32 38 45 48 55	95 95 95 95 95 115	4,0 4,5 8,0 10,0 12,0 15,0

5. Устанавливаются для конденсаторов допустимые нагрузки при синусоидальной форме напряжения (переменной составляющей напряжения).

Нагрузки определяются для каждого типоминнала конденсаторов и могут быть заданы с помощью номограмм и таблиц, отображающих зависимость допустимой амплитуды напряжения от частоты и температуры.

В качестве примера приведены такие нагрузки для конденсаторов К75-10 и К50-24 соответственно на рис. 3-12 и 3-13.

6. Устанавливаются для конденсаторов допустимые уровни несинусоидальных напряжений стандартных форм.

Таблица 3-9

Значение коэффициента Γ для расчета допустимой амплитуды импульсного тока в соответствии с (3-34) для металлизированных конденсаторов

Тип конденсатора	$U_{ном}$	$C_{ном}$, мкФ	Длина корпуса, см	Коэффициент Γ	Конструкция конденсатора
К75-10	250	0,1—0,33	3,8	0,107	Цилиндрическая
		0,47—2,2	5,2—5,5	0,066	
		3,3—10	9,5	0,030	
	500	0,1—0,68	6,2—6,5	0,107	"
		1 и 1,5	9,5	0,066	
		2,2 и 3,3	11,5	0,030	
	750	0,1—0,33	6,2—6,5	0,170	"
		0,47—1	9,5	0,107	
		1,5	11,5	0,050	
	1000	0,1—0,47	9—9,5	0,170	"
		0,68 и 1	9,5—11,5	0,107	
		0,1—0,33	3,6—3,8	0,056	
К75-24	400	0,47—4,7	5,2—5,5	0,037	Цилиндрическая
		4—10	4,5	0,045	
		0,1—0,33	3,6—3,8	0,075	
	630	0,47—2,2	5,2—5,5	0,049	"
		3,3 и 4,7	9,5	0,027	
		4—10	4,5	0,060	
	1000	0,1 и 0,15	3,8	0,100	Цилиндрическая
		0,22—1	5,2—5,5	0,066	
		1,5 и 2,2	9,5	0,036	
	1600	4—10	6,5	0,054	Прямоугольная
		0,1—0,68	5,2—5,5	0,080	
		1 и 1,5	9,5	0,044	
К73-11	160	2—10	6,5	0,065	Прямоугольная
		2,7—6,8	4,4	0,027	
		0,047—0,12	1,3	0,130	
	250	0,15—0,56	1,7—1,8	0,080	"
		0,68—2,2	3,0	0,040	
		0,022—0,068	1,3	0,170	
	400	0,082—0,33	1,7—1,8	0,100	"
		0,39—1	3,0	0,055	
		0,0001—0,027	1,3	0,250	
К73-11	630	0,033—0,082	1,7—1,8	0,150	"
		0,18—0,47	3,0	0,080	
		0,0022—0,01	2—2,3	0,033	
К73П-2	400	0,015—0,033	2,8	0,025	"
		0,047—0,33	3,6—3,8	0,017	
		0,47 и 0,68	5,2	0,010	
	630	0,5 и 1	3,1	0,020	Прямоугольная
		2—15	4,6	0,014	
		0,001—0,068	2—2,3	0,049	
	630	0,01—0,022	2,8	0,038	Цилиндрическая
		0,033—0,1	3,6—3,8	0,030	
		0,15—0,47	5,2	0,020	

Продолжение табл. 3-9

Тип кон-денсатора	$U_{ном}$	$C_{ном}$, мкФ	Длина корпуса, см	Кэф-фици-ент Г	Конструкция кон-денсатора
K71-5	1000	0,25 и 0,5	3,1	0,040	Прямоугольная
		1—10	4,6	0,026	"
		0,0047—0,01	2,8	0,080	Цилиндрическая
		0,015—0,047	3,6—3,8	0,055	"
		0,068—0,33	5,2	0,038	Прямоугольная
		0,5—6	4,6	0,044	"
		8 и 10	8,6	0,020	"
		0,01—0,068	1,95	0,240	Цилиндрическая
		0,01—0,022	2,1	0,24	"
		0,082—1	2,65	0,14	"
K71-4	160	0,082—1	2,65	0,14	"
K71-4	250	0,027—0,18	3,2	0,14	"
K71-4	250	0,22—1,5	4,8	0,086	"
K77-1	63	1,8—4,7	6,3	0,060	"
		5,6—10	8,3	0,047	"
		0,22—0,39	2,1	0,044	"
		0,47—2,2	3,2	0,025	"
		2,7—22	4,8	0,015	"
	100	0,1—0,22	2,1	0,075	"
		0,27—1,5	3,2	0,040	"
		1,8—3,9	4,8	0,027	"
		0,022—0,068	2,1	0,125	"
		0,082—0,39	3,2	0,070	"
		0,47—3,9	4,8	0,045	"
	400	0,001—0,0047	1,7	0,34	"
		0,0056—0,015	2,1	0,25	"
		0,018—0,1	3,2	0,14	"
		0,12—1	4,8	0,090	"
	40	0,22—1,8	2,1	0,025	"
		2,2—8,2	3,1	0,015	"
		1—2,7	4,8	0,009	"
		3,3—100	6,3	0,006	"
	63	0,056—1	2—2,1	0,0044	"
		1,2÷2,2	3—3,1	0,025	"
		2,7—22	4,8	0,015	"
	100	0,01—0,047	1,5—2,1	0,075	"
		0,056—0,56	2,1	0,050	"
		0,68—2,7	3,1	0,030	"
		3,3—10	4,8	0,018	"
		12—22	6,3	0,010	"
	160	0,1—0,18	2,1	0,088	"
		0,22—0,68	3,2	0,050	"
		0,82—4,7	4,8	0,030	"
		5,6—15	6,3	0,020	"
		10 и 20	4,6	0,030	Прямоугольная
	63	0,47—2,2	3,2	0,018	Цилиндрическая
		3,3—22	4,8	0,010	"
		0,1—1	3,2	0,035	"
		1,2—10	4,8	0,020	"

Продолжение табл. 3-9

Тип конденсатора	$U_{\text{ном}}$	$C_{\text{ном}}$, мкФ	Длина корпуса, см	Коэффициент Г	Конструкция конденсатора
К76-4	25	0,47—1,2	1,9	0,025	Цилиндрическая
		1,5—3,9	3,0	0,010	
		4,7—10	4,5	0,008	
К42У-2	160	0,047—0,22	2,4	0,035	"
		0,33—1,0	3,6	0,020	
		0,047—0,1	2,4	0,035	
	250	0,15—0,47	3,6	0,020	"
		1	5	0,014	
		0,033 и 0,047	2,4	0,06	
	400	0,068—0,33	3,6	0,035	"
		0,47	5	0,025	
		0,015 и 0,022	2,4	0,125	
	630	0,033—0,22	3,6	0,075	"
		0,01 и 0,1	3,6	0,095	
		0,15—0,22	5,0	0,065	
	1000	0,0047—0,047	3,6	0,14	"
		0,068—0,1	5,0	0,095	
	1600				"

Таблица 3-10

Допустимые значения импульсных токов конденсаторов с оксидным диэлектриком

Тип конденсатора	Значение емкости, мкФ, конденсатора и размер корпуса $\varnothing$ см $\times$ H см	Максимальное значение импульсного тока
К50-6; К50-16; К53-1Б; К53-18	—	0,02 А/мкФ
К53-15	—	0,05 А/мкФ
К53-1; К53-1А; К53-10	—	0,1 А/мкФ
К52-2	10—80 мкФ	5 А
К52-2В	100—1000 мкФ	5 А
К52-5	6,8—33 мкФ	5 А
	68—330 мкФ	5 А
К52-1 К52-1Б	0,3 $\times$ 1,1	5 А
	0,4 $\times$ 1,45	5 А
	0,46 $\times$ 1,75	5 А
	0,6 $\times$ 2,0	5 А
	0,75 $\times$ 2,25	5 А
К52-1А	—	5 А

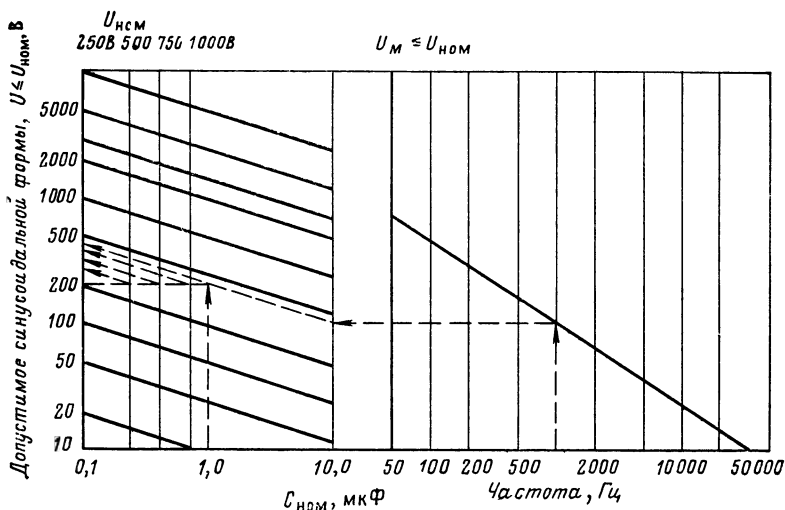


Рис. 3-12. Номограмма допустимых амплитуд синусоидальных напряжений для конденсаторов К75-10 при $U_{\text{макс}} \leq U_{\text{ном}}$.

Они могут быть заданы либо в виде самостоятельных номограмм (рис. 3-14—3-49) с учетом ограничений, изложенных в пп. 1—4, либо в виде коэффициентов снижения допустимой амплитуды синусоидального напря-

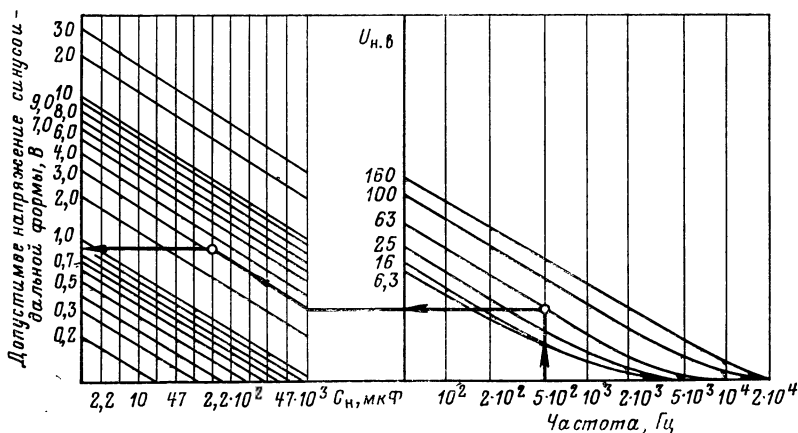


Рис. 3-13. Номограмма допустимых переменных составляющих напряжения синусоидальной формы для конденсаторов К50-24.

Дано: $t^\circ = 25^\circ\text{C}$, $f = 500$ Гц, $C_{\text{ном}} = 220$ мкФ, $U_{\text{ном}} = 6,3$ В. Находим $U_1 = 0,85$ В.

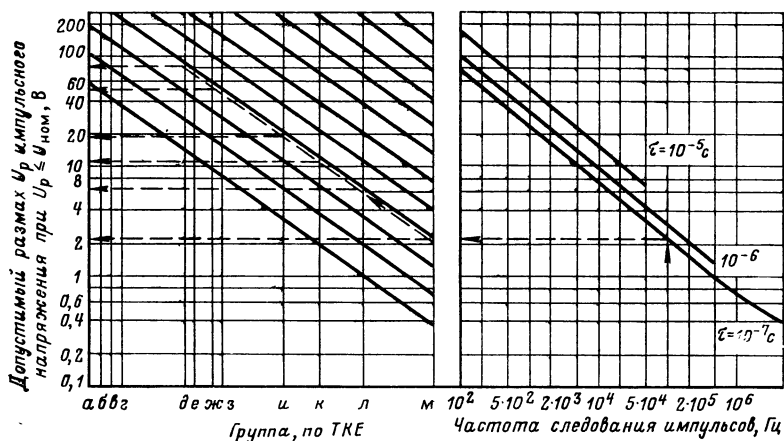


Рис 3-14. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов КМ.

а — КМ-4,5: ПЗЗ, М47; б — КМ-4,5 М75; в — КМ-4,5 М750; г — КМ-4,5 М1500; д — КМ-6 ПЗЗ, М47; е — КМ-6 М75; ж — КМ-6 М750; з — КМ-6 М1500; и — КМ-3,5 НЗ0; к — КМ-4 НЗ0; л — КМ-6 Н50; КМ-5 Н90; м — КМ-6 Н90.

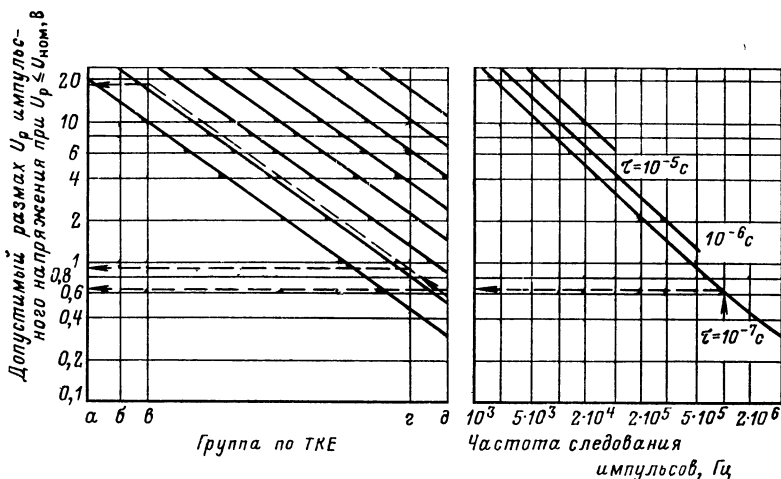


Рис. 3-15. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К10-17.

а — М75; б — М750; в — М1500; г — Н50; д — Н90.

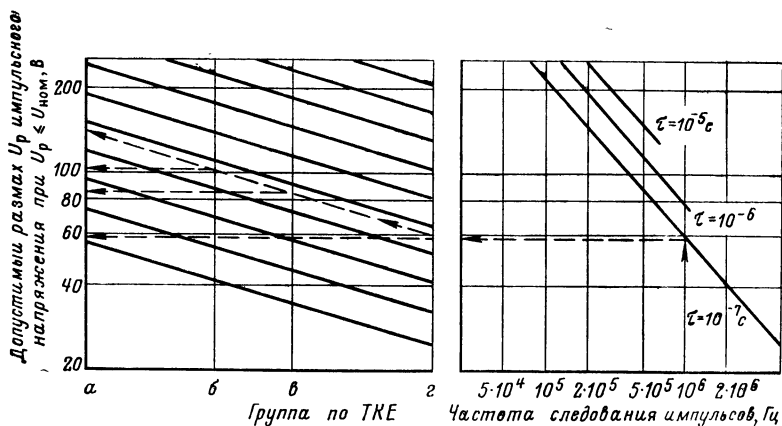


Рис. 3-16. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К21-8.

а — П60, П33; б — М75, М47, МПО; в — М-150; г — М330.

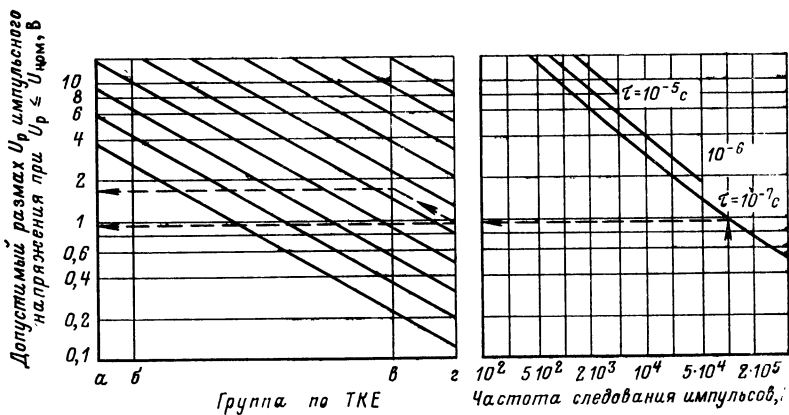


Рис. 3-17. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К10-9.

а — М750; б — М1500; в — Н30; г — Н90.

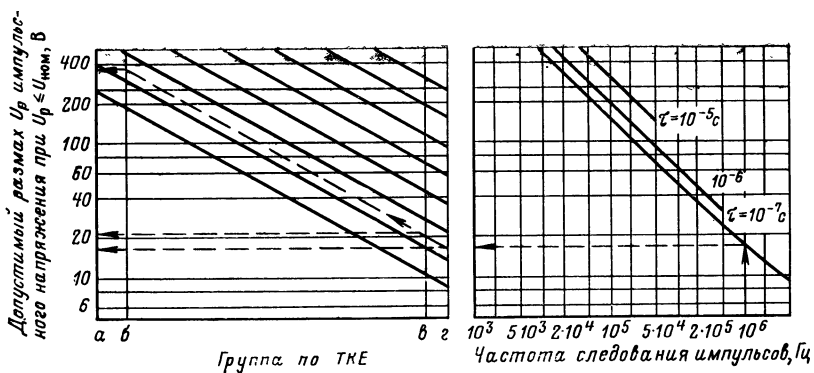


Рис. 3-18. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К10-18; К10-19.

а — К10-18 М750; б — К10-18 М750; в — К10-18 Н70; г — К10-19 Н70.

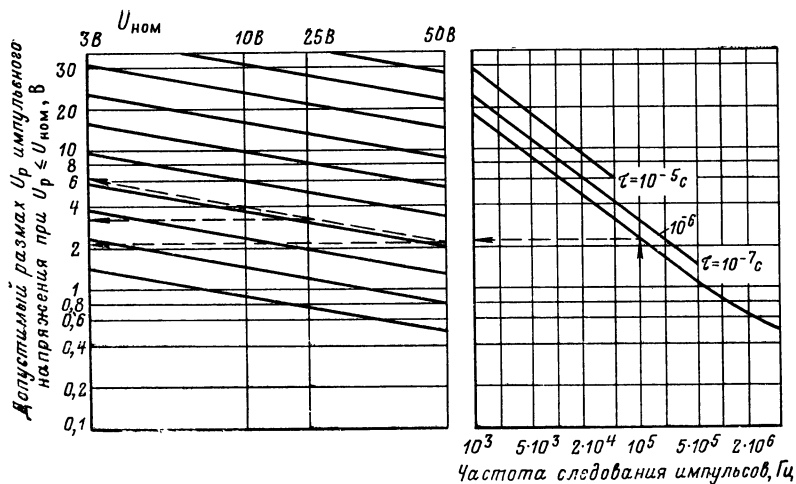


Рис. 3-19. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К10У-5.

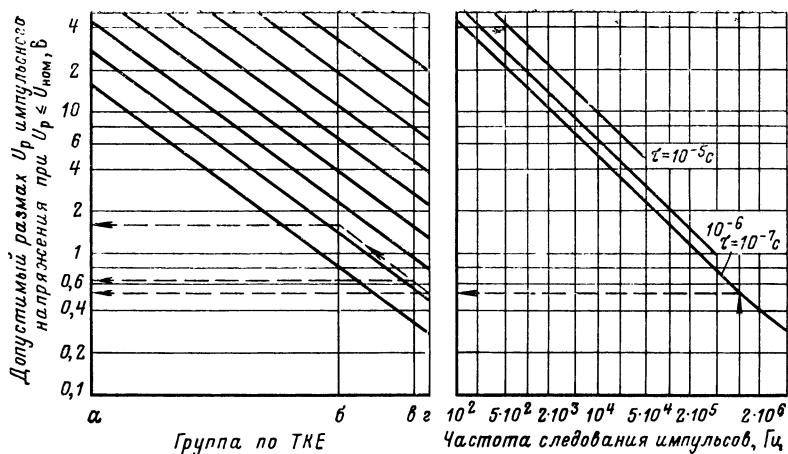


Рис. 3-20. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К10-27, К10-28, К10-33.

а — К10-33 МПО; б — К10-27 Н50; в — К10-28 Н30; г — К10-33 Н90.

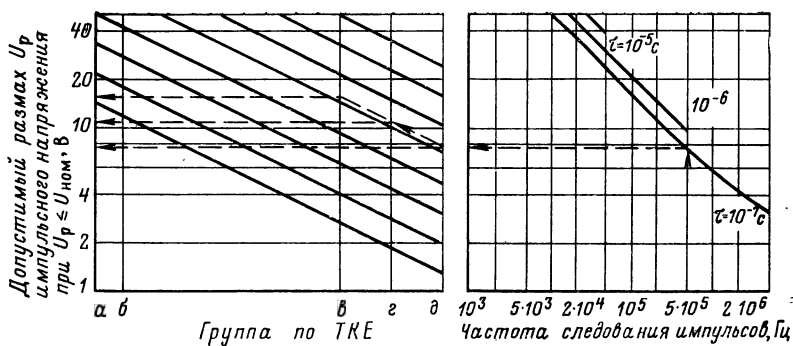


Рис. 3-21. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К10-7В.

а — М750; б — М1500; в — Н30; г — Н70; д — Н90.

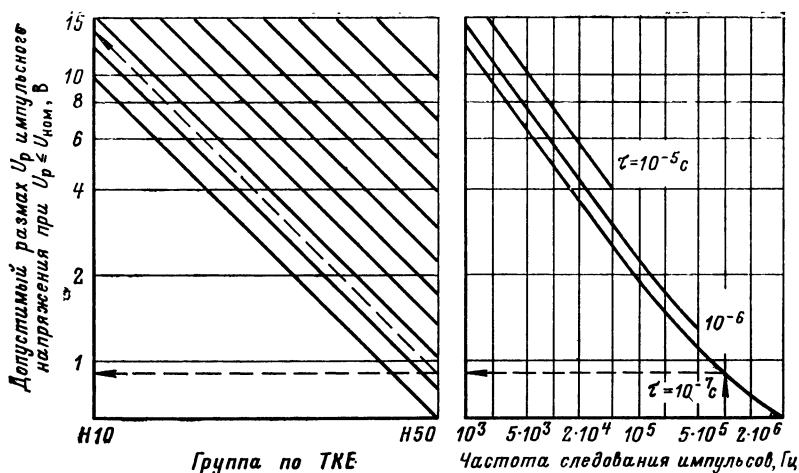


Рис. 3-22. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К10-22.

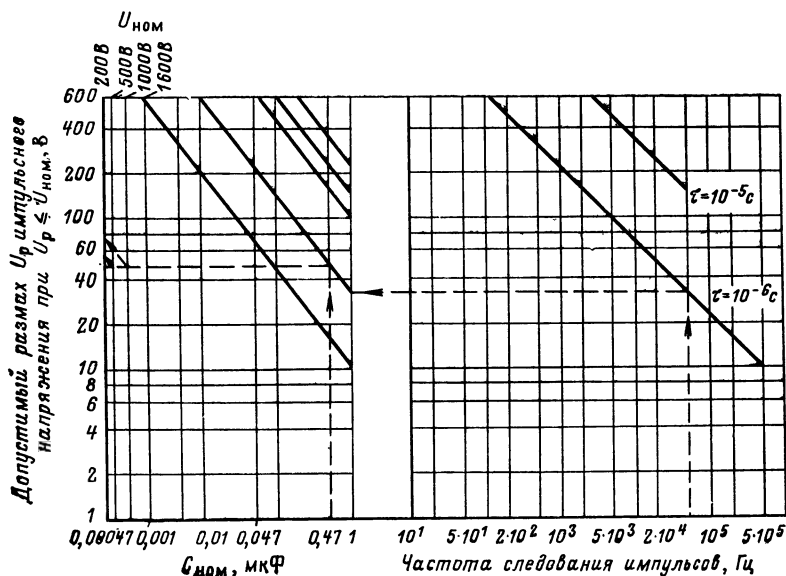


Рис. 3-23. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К72П-6.

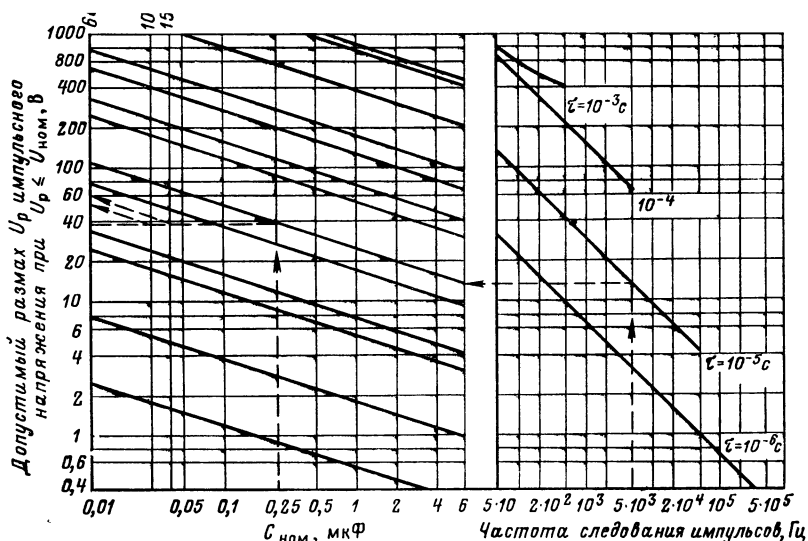


Рис. 3-24. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К40У-5.

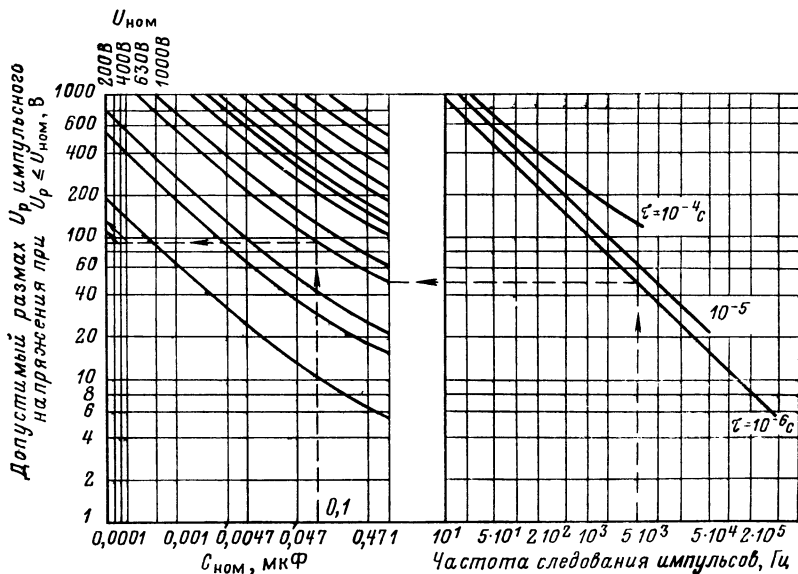


Рис. 3-25 Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К40У-9.

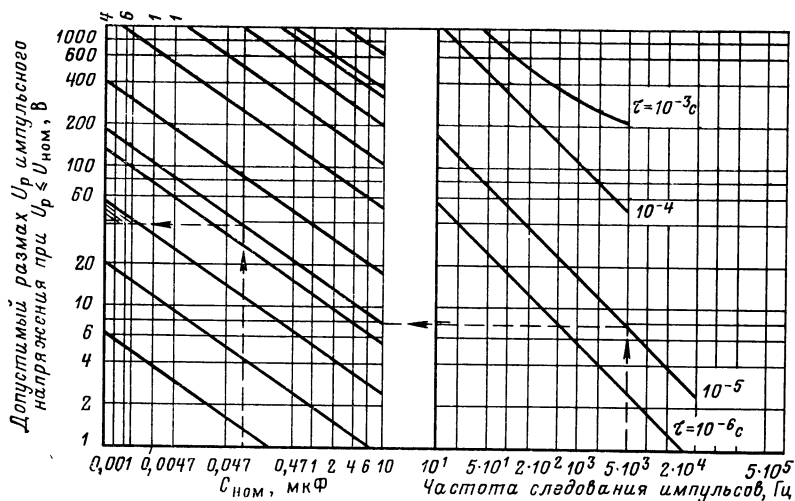


Рис. 3-26. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К75-12.

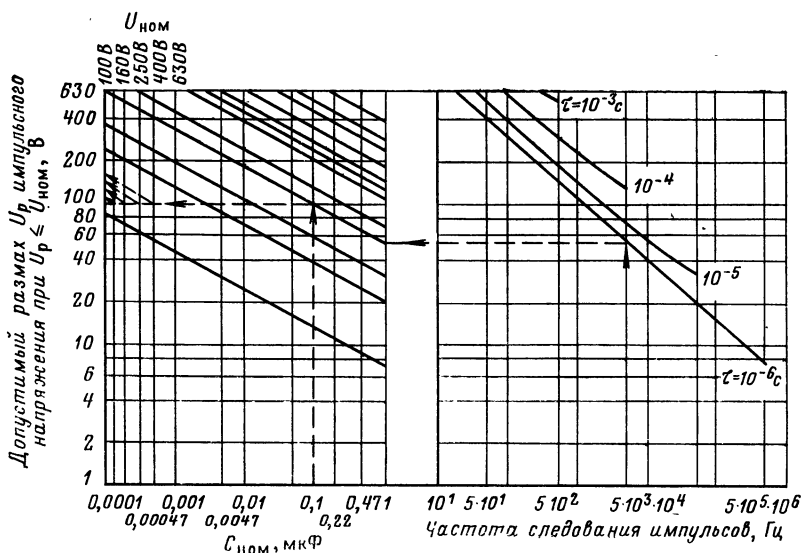


Рис. 3-27. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К73-15.

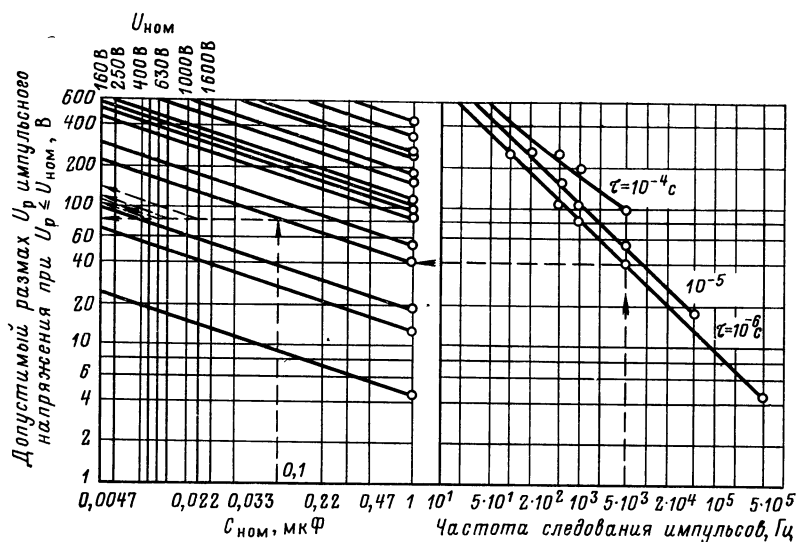


Рис. 3-28. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К42У-2.

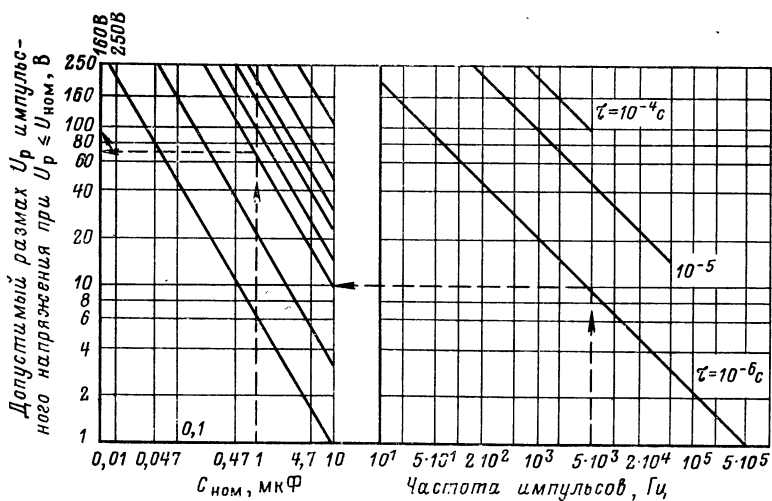


Рис. 3-29. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К71-4, К71-5.

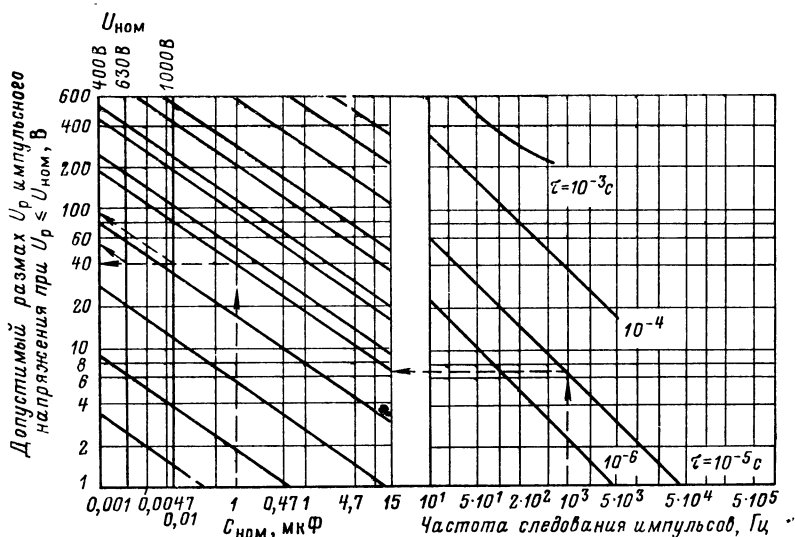


Рис. 3-30. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К73П-2.

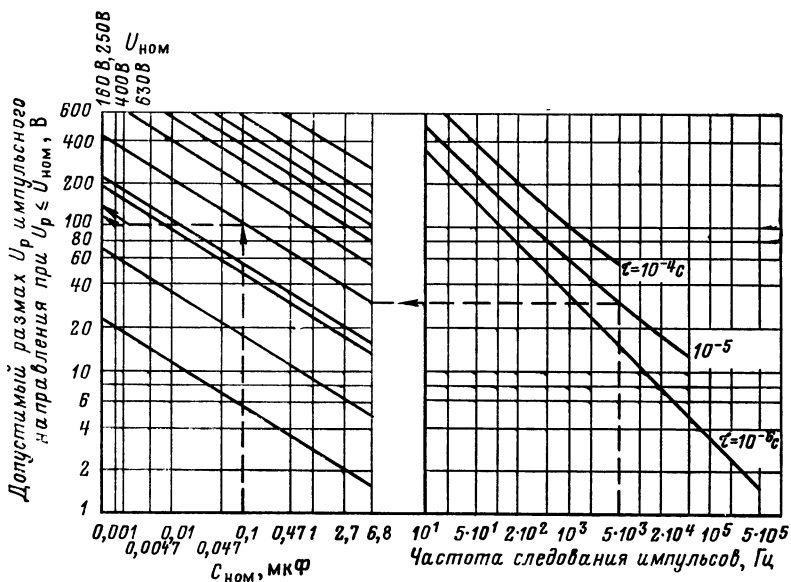


Рис. 3-31. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К73-11.

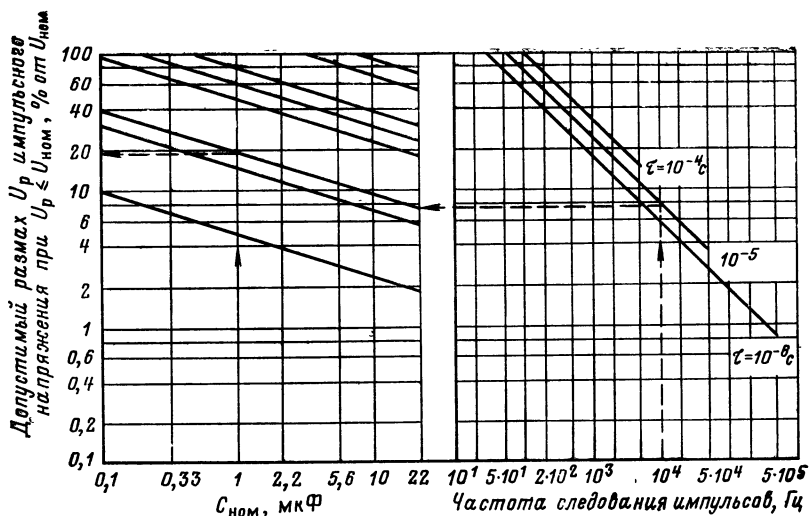


Рис. 3-32. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К73-16.

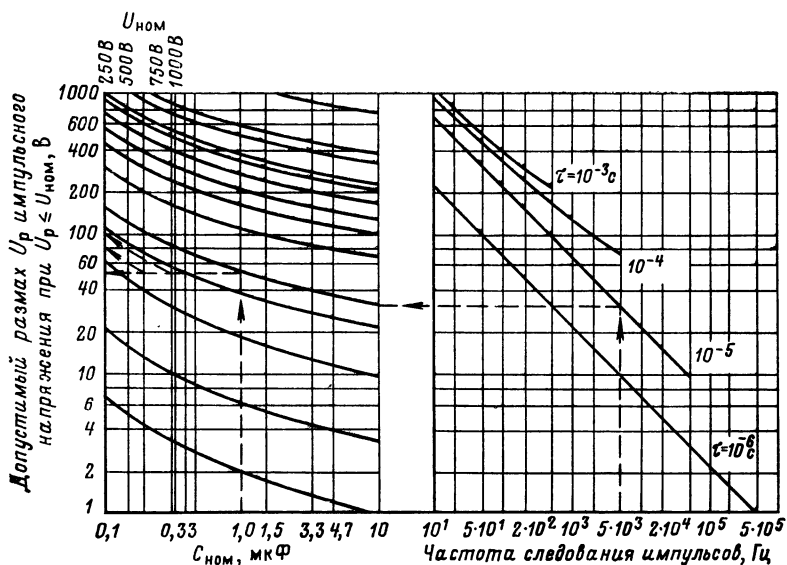


Рис. 3-33. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К75-10.

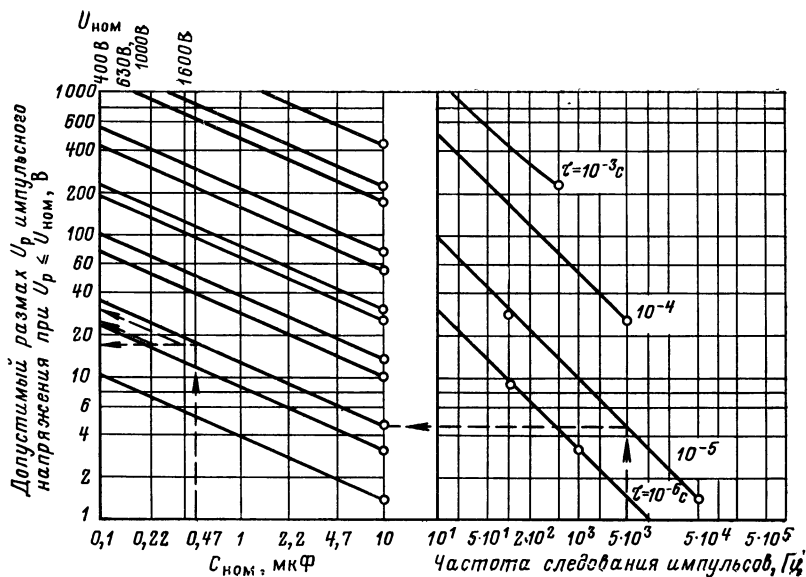


Рис. 3-34. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К75-24.

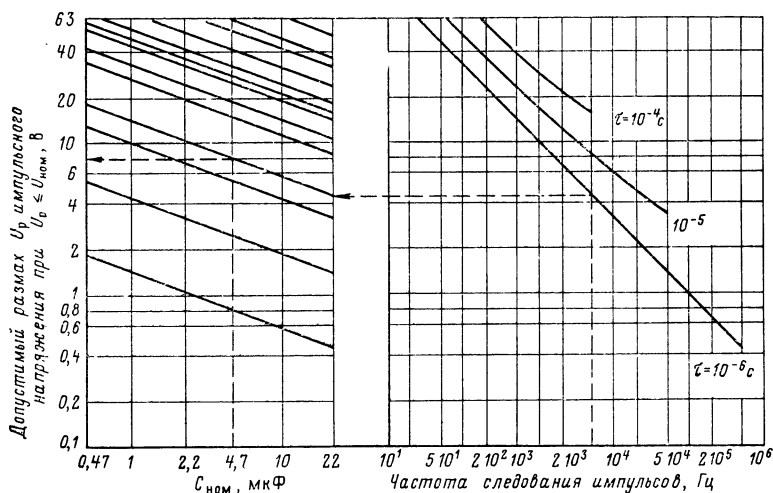


Рис. 3-35. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К76П-1.

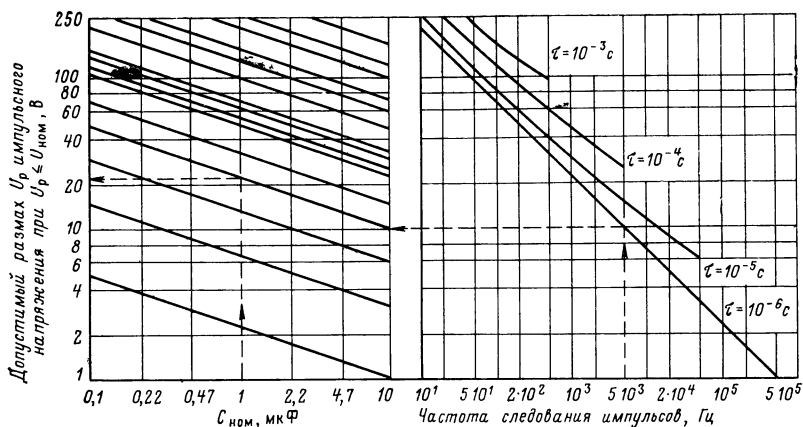


Рис. 3-36. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К76-3.

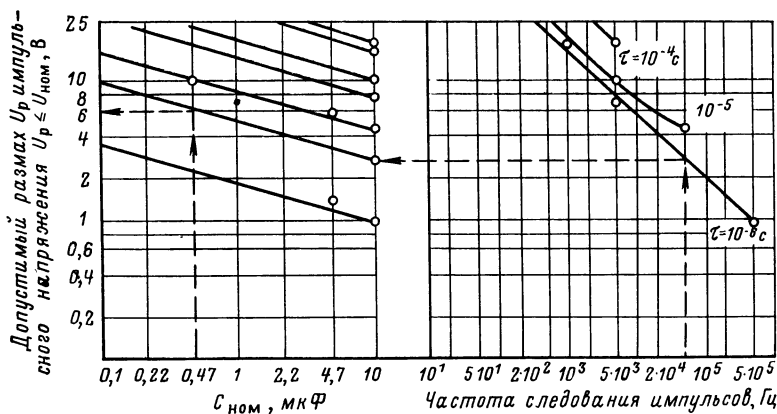


Рис. 3-37. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К76-4.

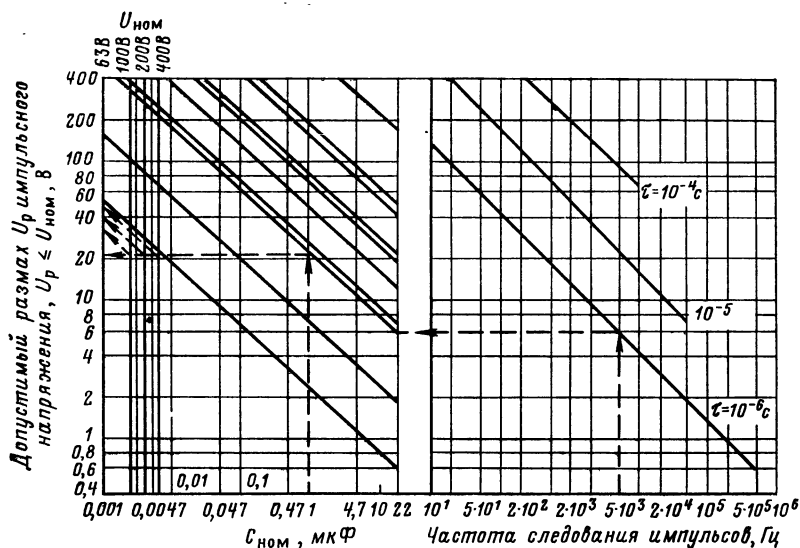


Рис. 3-38. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К77-1.

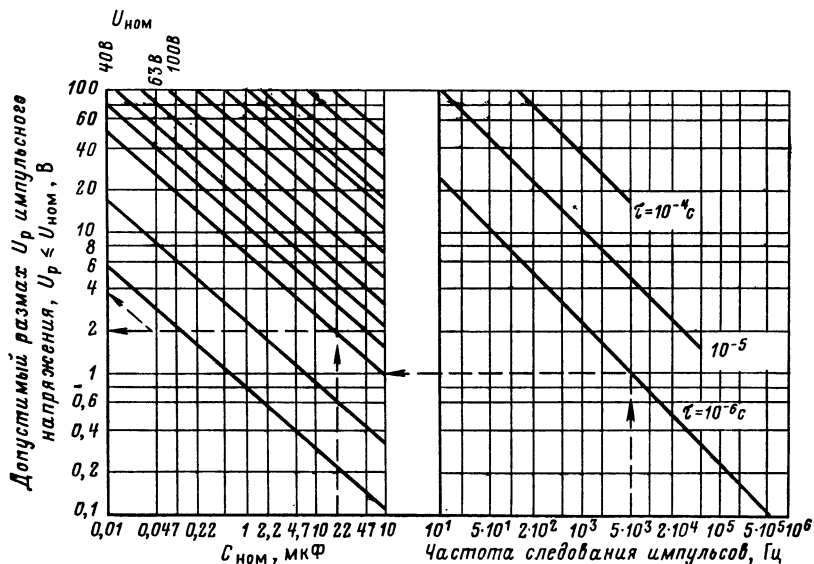


Рис. 3-39. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К77-2.

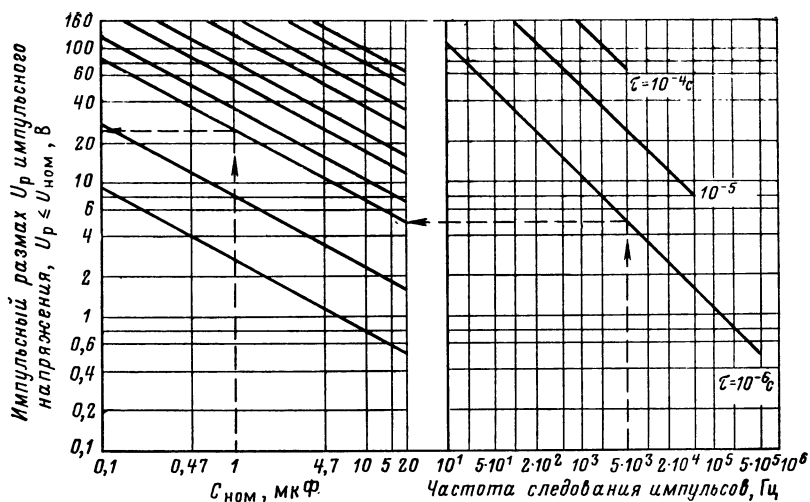


Рис. 3-40. Зависимость допустимого размаха U_p импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов импульса для конденсаторов К77-4.

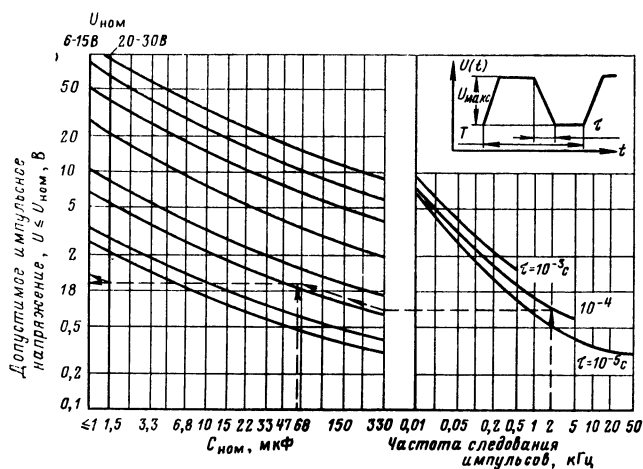


Рис. 3-41. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К53-1, К53-1А, К53-1Б, К53-10.

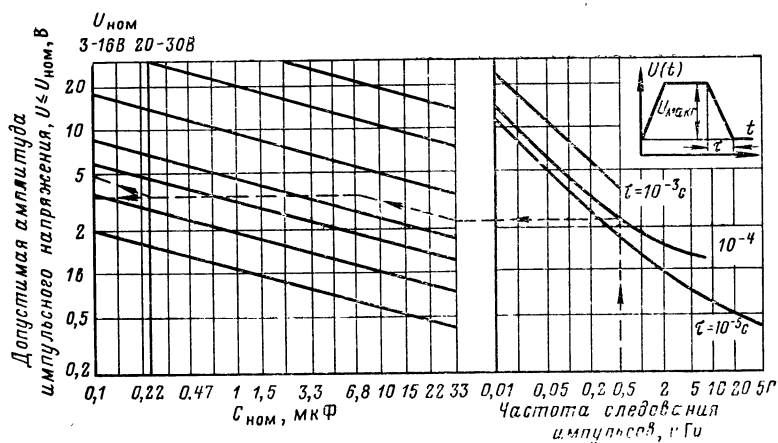


Рис. 3-42. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К53-15.

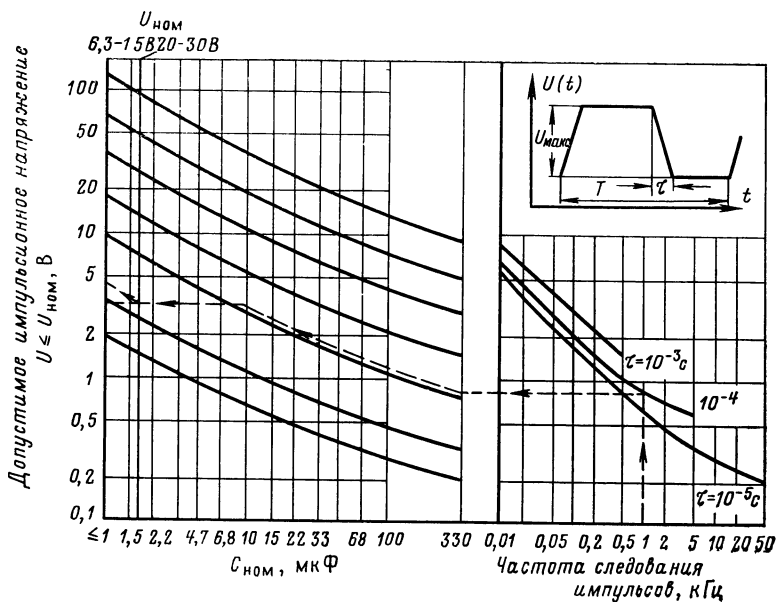


Рис. 3-43. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К53-18.

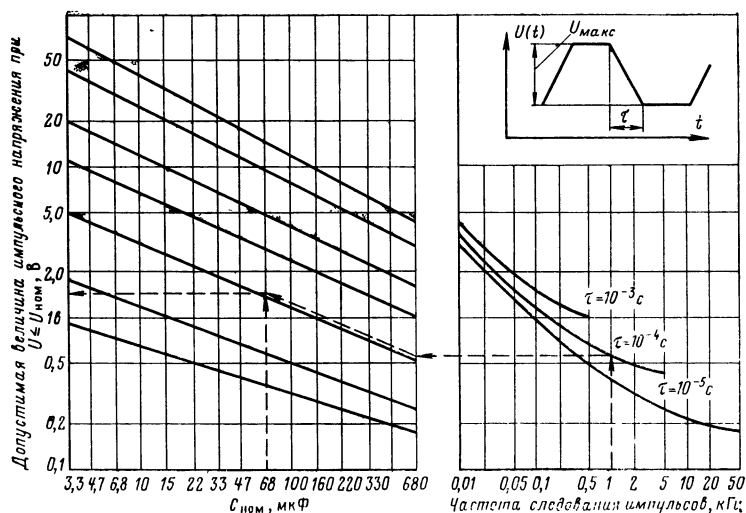


Рис. 3-44. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К52-1, К52-1А, К52-1Б.

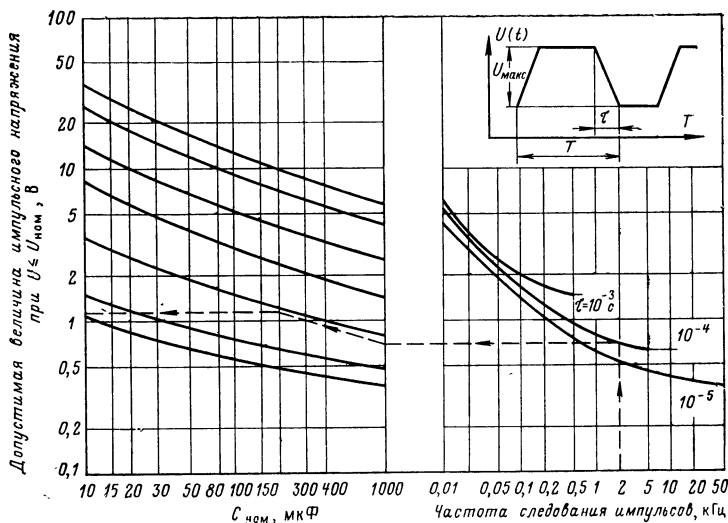


Рис. 3-45. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К52-2, К52-2В, К52-5.

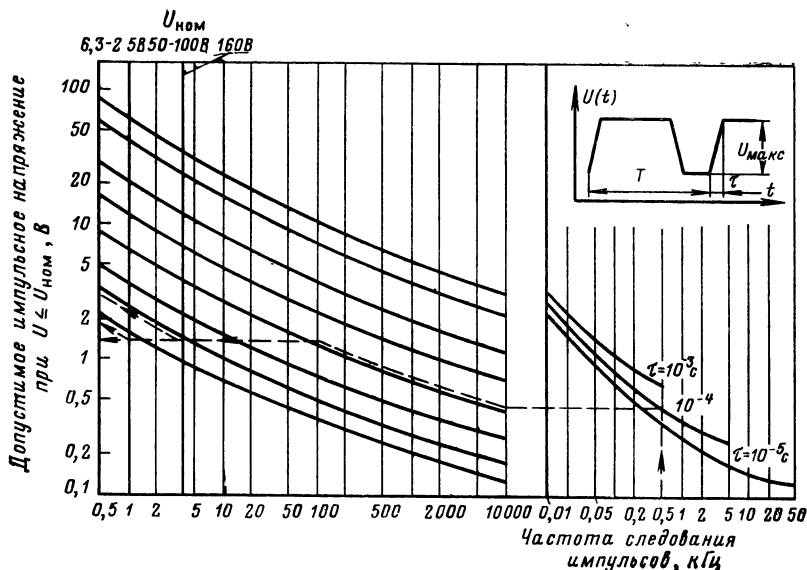


Рис. 3-46. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К50-6, К50-16.

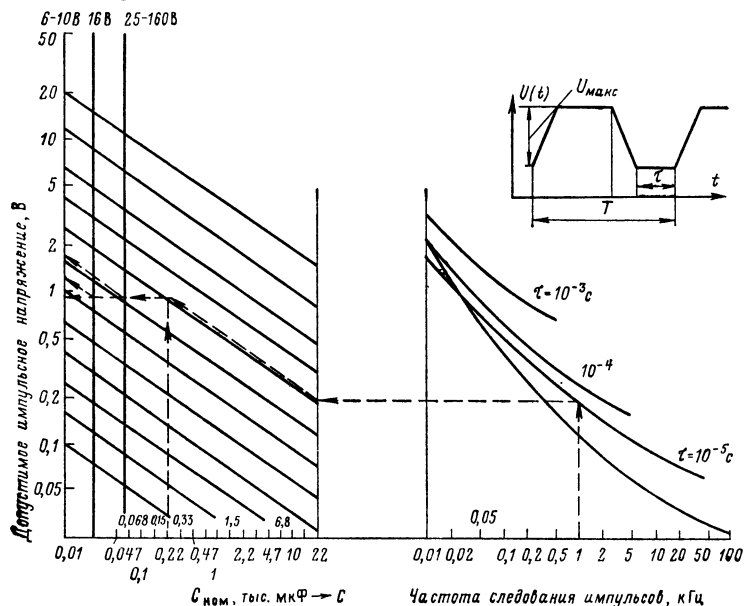


Рис. 3-47. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К50-22.

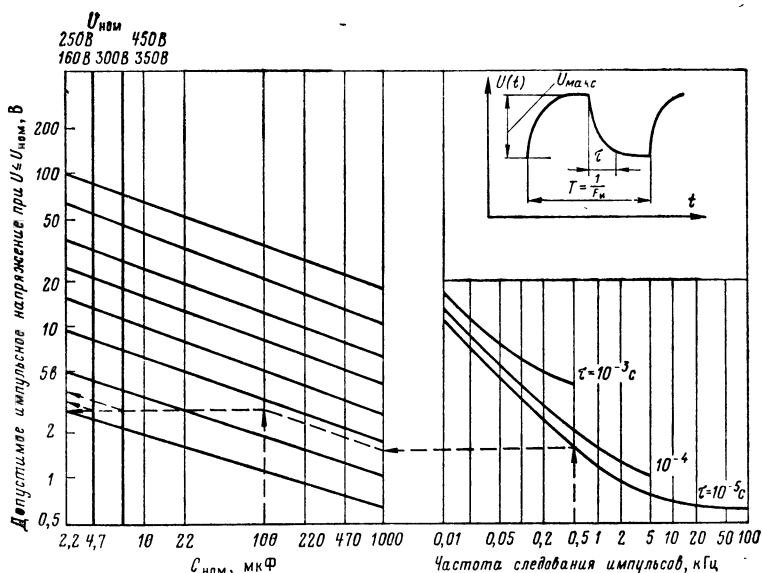


Рис. 3-48. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К50-27

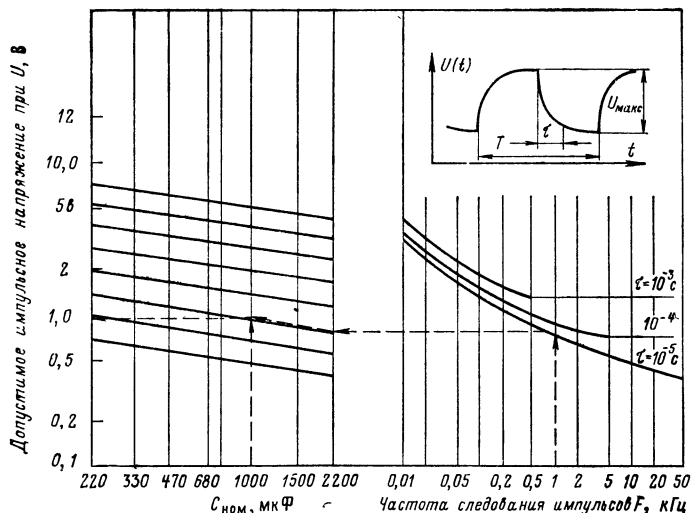


Рис. 3-49. Зависимость допустимой амплитуды униполярного импульсного напряжения от частоты и длительности фронтов для конденсаторов К52-7.

жения соответствующей частоты, указанных в п. 5, и ограничений, изложенных в пп. 2—4.

7. При нестандартных формах напряжения допустимые нагрузки на конденсаторе лимитируются на основе пп. 1—4.

Следует отметить, что ограничения, установленные для конденсаторов пп. 1—4, достаточны и, в принципе, нагрузки по пп. 5 и 6 отдельно могут и не устанавливаться. Однако они желательны для разработчиков радиоэлектронной аппаратуры, так как позволяют уже на этапе эскизного проектирования предварительно сделать выбор того или иного типа конденсатора.

3-6. ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ДЛЯ МАССОВЫХ ТИПОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Для массовых типов конденсаторов определены стандартные уровни нагрузок в случае воздействия видеоимпульсов трапецеидальной, пилообразной, треугольной и экспоненциальной форм напряжения. Эти нагрузки заданы в виде номограмм (рис. 3-14—3-49*) и табл. 3-9—3-10.

Для конденсаторов, номограммы которых приведены на рис. 3-14—3-30 для заданных величин номинальной емкости $C_{ном}$, номинального напряжения $U_{ном}$, частоты повторения $F_{и}$ и длительностей фронта τ_f или спада τ_c (учитывается наименьший из этих параметров), определяется допустимое напряжение так, как это показано пунктирными линиями на каждой номограмме.

Для конденсаторов с металлизированными обкладками (рис. 3-27—3-40) помимо значения U_p , определенного из номограммы, следует проверить выполнение следующих неравенств:

$$\left. \begin{aligned} U_p &\leq 8,5 \cdot 10^5 \Gamma \sqrt{\tau_f}; \\ U_p &\leq 8,5 \cdot 10^5 \Gamma \sqrt{\tau_c}, \end{aligned} \right\} \quad (3-36)$$

где U_p приведено в вольтах, τ — в секундах.

Значения коэффициента Γ для конденсаторов некоторых типов приведены в табл. 3-9.

* Расчет номограмм производился инженерами Л. С. Варшалович, Б. И. Картышевым, В. И. Кругловой, О. Л. Мезениным, В. Г. Секретаревой.

Если неравенства не выполняются, то значение U_p , определенное из номограмм, должно быть скорректировано.

Рассмотрим пример.

Дано: конденсатор с металлизированными обкладками типа К75-10, $C_{\text{ном}} = 1$ мкФ, $U_{\text{ном}} = 500$ В.

На конденсатор воздействует периодическое напряжение трапецидальной формы с параметрами: $\tau_{\phi} = 10^{-5}$ с; $\tau_c = 5 \cdot 10^{-5}$ с; $F_{\text{и}} = 5$ кГц.

Определить допустимое значение размаха напряжения U_p , воздействующего на конденсатор.

С помощью номограммы, приведенной на рис. 3-33, для заданного режима находим (см. пунктирные линии на этом рисунке), что в данном случае допустимое значение U_p составляет 80 В. При определении U_p учитывалась длительность фронта τ_{ϕ} , так как она меньше длительности спада τ_c .

Проверим, выполняются ли неравенства (3-36).

Из табл. 3-9 для рассматриваемого конденсатора находим коэффициент $\Gamma = 0,066$.

Подставив значения U_p , Γ , τ_1 , τ_2 в формулы (3-36), убеждаемся, что указанные неравенства выполняются.

Определим теперь U_p при тех же исходных данных, но при $F_{\text{и}} = 500$ Гц.

Из номограммы (рис. 3-33) находим $U_p = 230$ В.

Однако неравенство 3-36 в этом случае не выполняется, поэтому величина U_p должна быть снижена до

$$U_p = 8,5 \cdot 10^5 \cdot 0,066 \sqrt{10^{-5}} = 175 \text{ В.}$$

При наличии постоянной составляющей напряжения (рис. 3-2) U_p определяется вышеуказанным способом. Кроме того, должно быть соблюдено условие

$$U_{\text{пик}} \leq U_{\text{ном.}}$$

Для конденсаторов с оксидным диэлектриком (рис. 3-41—3-49) должны быть учтены также ограничения, накладываемые полярностью конденсатора и величиной тока, протекающего через конденсатор (табл. 3-10).

Пусть, например, требуется найти допустимое значение переменной составляющей напряжения трапецидальной формы $U_{\text{макс}}$ для алюминиевого конденсатора К50-6 при следующих исходных данных:

$$U_{\text{ном}} = 25 \text{ В; } C_{\text{ном}} = 100 \text{ мкФ; } F_{\text{и}} = 0,5 \text{ кГц;}$$

$$\tau_{\phi} = \tau_c = \tau = 10^{-4} \text{ с.}$$

С помощью номограммы, приведенной на рис. 3-46, находим (см. пунктирную линию) $U_{\text{макс}} = 1,3$ В.

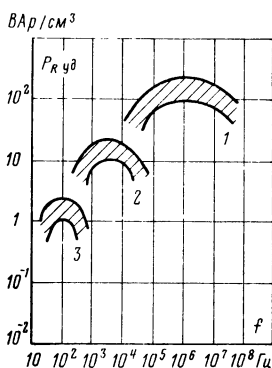
Кроме того, из табл. 3-10 определяем, что амплитуда импульсного тока, протекающего через конденсатор при формировании фронта или спада напряжения, не должна превышать 2 А.

3-7. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ ОДИНАКОВЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

При выборе конденсаторов для конкретных условий применения помимо оценки допустимости данного режима эксплуатации необходимо учитывать и их массогабаритные характеристики. В одних и тех же электрических режимах могут быть работоспособны конденсаторы различных типов, имеющие разные виды рабочего диэлектрика, различное конструктивное выполнение и, естественно, различные габариты и массу. Это положение подтверждается, например, данными, приведенными на рис. 3-14—3-49. Нетрудно видеть, что в одинаковых электрических режимах могут быть применены различные типы представленных здесь конденсаторов. Поэтому для правильного выбора типа конденсатора важным является сравнение различных конденсаторов между собой по удельным характеристикам для конкретных условий эксплуатации.

Рис. 3-50. Зависимости $P_{\text{уд}} = \varphi(f)$ для конденсаторов из различных диэлектриков.

1 — керамика, стекло; 2 — неполярные пленки; 3 — пропитанная бумага, полярные пленки.



В случае нагружения конденсаторов переменным напряжением синусоидальной формы удобной характеристикой для сравнения служит удельная реактивная мощность

$$P_{R \text{ уд}} = \frac{P_R}{V} = \frac{U^2 \omega C}{V}, \quad (3-37)$$

где V — объем конденсатора.

На рис. 3-50 показаны ориентировочные зависимости удельных реактивных мощностей от частоты для

конденсаторов, выполненных на основе различных диэлектриков [1]. Как следует из этих данных, для конденсаторов различных типов максимальное значение удельной реактивной мощности располагается в различном диапазоне частот, причем с уменьшением угла потерь конденсатора максимум P_R возрастает и сдвигается в сторону более высоких частот.

При работе конденсаторов в цепях фильтров при пульсирующем напряжении с пульсацией синусоидальной формы полезной характеристикой для выбора конденсаторов может служить также действующее значение удельной емкости конденсатора

$$C_{\text{дейст. уд}} = \frac{C}{V} = \frac{1}{\omega ZV} = \frac{C_{\Pi}}{V \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}, \quad (3-38)$$

где Z , C_{Π} , $\operatorname{tg} \delta$ — соответственно полное сопротивление, последовательная емкость и тангенс угла потерь конденсатора, измеренные на рабочей частоте f .

В качестве примера в табл. 3-11 приведены зависимости действующего значения удельной емкости от частоты для конденсаторов нескольких типов.

Таблица 3-11

Зависимость действующего значения удельной емкости, мкФ/см², от изменения частоты для конденсаторов разных типов при $T_{\text{окр}}=20^\circ\text{C}$

Тип конденсатора	Частота, Гц				
	5·10 ³	10 ³	10 ⁴	2·10 ⁴	10 ⁵
K50-24-25-22	83	48	8,3	5,6	0,83
K50-27-160-22	7,9	7,2	4,3	2,2	0,65
K52-1Б-63-22	74	72	39	23	9,0
K53-18-40-22	48	45,5	31,6	21,3	6,1
K53-1А-30-33	50,5	47	30	23	7,5
K76П-1-22	1,22	1,22	1,2	1	0,9

При несинусоидальных напряжениях стандартных форм, например при использовании конденсаторов в качестве емкостных накопителей энергии передающих устройств, коммутирующих элементов в тиристорных преобразователях и т. д., удобной характеристикой для их сравнения и выбора может служить удельная энергия. Выражение удельной энергии представим в виде

$$W_{\text{уд}} = \frac{C_{\text{ном}} U_{\text{р. доп}}^2}{2V}, \quad (3-39)$$

где $U_{р.доп}$ — допустимый размах напряжения на конденсаторе.

Поскольку свойства конденсатора должны в основном определяться его рабочим диэлектриком, представляет интерес произвести сравнение различных диэлектриков по величине обеспечиваемой удельной энергии, равной

$$W_{уд} = \frac{\epsilon E_{доп}^2}{2V} 8,84 \cdot 10^{-14},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость; $E_{доп}$ — допустимая напряженность поля в рабочем диэлектрике.

Величины $U_{р.доп}$ и $E_{доп}$ для конденсаторов (конденсаторных диэлектриков) являются функциями параметров воздействующего напряжения, температуры и пр. Выбор этих величин производится с учетом основных факторов, присущих работе конденсатора, о которых говорилось выше (см. § 3-2). С учетом этих факторов можно в первом приближении рассчитать и построить семейство кривых, характеризующих зависимость $W_{уд}$ от параметров электрического режима для конкретных типов диэлектриков или конденсаторов. Такое семейство может быть использовано для предварительного выбора типа конденсатора (или подходящей группы конденсаторов, выполненных на основе одинаковых видов диэлектриков, обеспечивающих наиболее высокие значения $W_{уд}$ в требуемых режимах.

На рис. 3-51 приведены расчетные зависимости $W_{уд}^*$ от параметров напряжения симметричной трапециoidalной формы для разных органических диэлектриков [23]. При низких частотах напряжения ($F_H < 50$ Гц) и длительностях зарядной (разрядной) стадий ($\tau \geq 100$ мкс) наибольшую удельную энергию обеспечивает полярный диэлектрик (в рассматриваемом случае комбинация ПЭТФ + КОН-II). Однако при повышении частоты и уменьшении длительности коммутации τ более высокие значения $W_{уд}$ обеспечивает слабополярный диэлектрик (в данном случае поликарбонат), который, хотя и имеет по сравнению с полярным диэлектриком меньшие значения ϵ , но дает выигрыш в удельных характеристиках в связи с более низким значением коэффициента N . При частотах повторения 1—10 кГц и соответственно дли-

* В расчетах принимал участие инженер О. Л. Мезенин.

тельность коммутации 100—10 мкс преимущества по $W_{уд}$ переходят к неполярному диэлектрику (ПТФЭ), который имеет еще более низкие значения N по сравнению с полярным и слабополярным диэлектриками.

Рассмотрим пример.

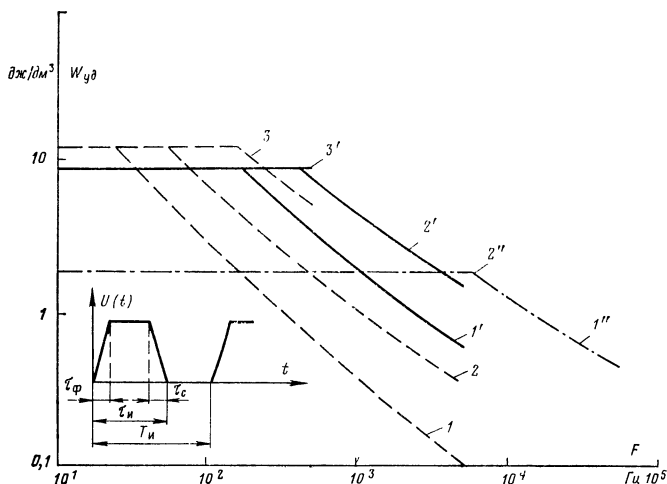


Рис. 3-51. Расчетная зависимость удельной энергии $W_{уд} = \varphi(F_n, \tau)$ от частоты и длительности фронта (спада) трапецидального импульсного напряжения при $\tau_f = \tau_c = \tau$; $T_n = 2(\tau_n - \tau)$; $F_n = \frac{1}{T_n}$; для органических диэлектриков при статической напряженности поля $E_{ст} = 39,5 \frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$.

1, 1', 1'' — $\tau = 10^{-5}$ с; 2, 2', 2'' — $\tau = 10^{-4}$ с; 3, 3' — $\tau = 10^{-3}$ с; — — — ПК; — — — — ПЭТФ+КОН-11; — — — — ПТФЭ, ПЭ, ПС.

Пусть необходимо выбрать конденсатор для работы в качестве коммутирующего элемента в тиристорном преобразователе, который обладал бы наименьшими габаритами и массой из известных типов конденсаторов при следующих исходных данных: напряжение трапецидальной формы, $\tau_f = \tau_c = \tau = 10^{-4}$ с; $F_n = 10^3$ Гц; $U_p = 400$ В; $C_{ном} = 1$ мкФ.

Из графиков, приведенных на рис. 3-51, находим, что в этом режиме в первом приближении наилучшие удельные характеристики (удельную энергию) могут обеспечить конденсаторы, выполненные на основе слабополярного диэлектрика, в рассматриваемом случае — поликар-

бонат. При этом выигрыш по $W_{уд}$ по сравнению с конденсаторами на полярном диэлектрике достигает 4 раз. Уточним теперь наиболее подходящие типы конденсаторов и определим более точно, какой будет достигнут выигрыш в массе и габаритах, если будут выбраны конденсаторы на основе поликарбонатной пленки по сравнению с конденсаторами других типов.

Из номограмм допустимых нагрузок (рис. 3-38—3-40) поликарбонатных конденсаторов (серии К77) наиболее подходящим является конденсатор типа К77-1 (см. рис. 3-38). Из этой номограммы находим, что заданный режим обеспечивает конденсатор с номинальным напряжением $U_{ном}=400$ В. Из конденсаторов с полярным диэлектриком подходящим является конденсатор К75-10. Из номограммы для этого типа конденсаторов (см. рис. 3-33) находим, что заданный режим обеспечивает лишь конденсатор с номинальным напряжением $U_{ном}=750$ В.

Масса и объем выбранных типов конденсаторов, а также сравнительные данные по этим характеристикам конденсаторов приведены в табл. 3-12.

Таблица 3-12

Технические характеристики различных типов конденсаторов

Тип конденсатора	Масса конденсатора, г	Объем конденсатора, см ³	Отношение массы конденсатора к массе конденсатора К77-1-400-1,0	Отношение объема конденсатора к объему конденсатора К77-1-400-1,0
К77-1-400-1,0	95	39,4	1	1
К75-10-750-1,0	390	170	4,1	4,3

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА КОНДЕНСАТОРЫ

4-1. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ КОНДЕНСАТОРОВ

К климатическим факторам внешней среды относятся температура, влажность воздуха, давление воздуха или газа (высота над уровнем моря), солнечная радиация, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), резкие смены температур, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов. Рассмотрим влияние основных факторов на конденсаторы.

Влажность воздуха является одним из основных климатических факторов, определяющих работоспособность конденсаторов.

Абсолютная влажность характеризуется количеством водяных паров в граммах в 1 м³ воздуха. Упругость водяного пара в воздухе характеризует парциальное давление водяных паров и в широком диапазоне температур численно примерно равна абсолютной влажности. Каждой температуре соответствует максимально возможное количество водяных паров, превышение которого приводит к осаждению влаги в жидком или твердом виде. Это состояние называют насыщеннем. Относительная влажность показывает, сколько процентов максимально возможной влажности фактически находится в воздухе. При повышении температуры относительная влажность снижается, а при понижении температуры повышается. Температуру, при которой относительная влажность достигает 100% при данном значении абсолютной влажности, называют точкой росы.

Из практики известны случаи, когда аппаратура, нормально функционирующая при наладке, настройке и при стендовых испытаниях в лабораторных условиях, оказывалась практически неработоспособной при эксплуатации в среде с повышенной влажностью

Таблица 4-1

Параметры, характеризующие влажность воздуха

Параметры влажности воздуха	Размерность	Обозначение	Примечание
Упругость водяного пара в воздухе	Па	e	—
Абсолютная влажность воздуха	г/м ³	a	$\alpha = \frac{1,06 e}{1 + 0,00366 T^{\circ}\text{C}}$
Упругость водяного пара в воздухе при насыщении для данной температуры	Па	E	—
Абсолютная влажность воздуха при насыщении для данной температуры	г/м ³	A	—
Относительная влажность воздуха для данной температуры	%	r	$r = \frac{e}{E} 100 \%$ или $r = \frac{a}{A} 100 \%$

из-за массовых отказов конденсаторов. Для характеристики влажности воздуха используется ряд параметров, указанных в табл. 4-1.

Технические условия и стандарты на конденсаторы обычно оговаривают максимально допустимое значение относительной влажности при конкретной температуре. Для упрощения пересчета на рис. 4-1 приведена зависимость относительной влажности от

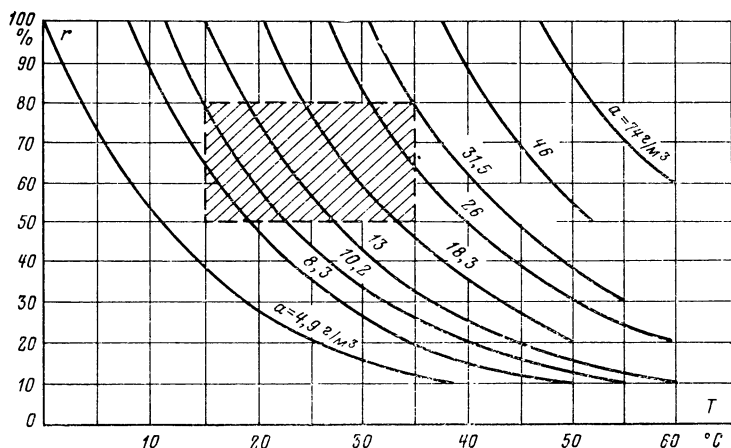


Рис. 4-1. Зависимость относительной влажности воздуха от температуры при различных значениях абсолютной влажности.

температуры при различных значениях абсолютной влажности (область нормальных условий заштрихована).

Конденсаторы предназначаются для работы в аппаратуре, эксплуатируемой в различных условиях и поэтому выпускаются в разном климатическом оформлении. Современные Государственные стандарты [27, 28, 29] в зависимости от условий эксплуатации предусматривают следующие климатические категории:

Для эксплуатации на суше, реках, озерах

- У — для районов с умеренным климатом;
- ХЛ — для районов с холодным климатом;
- ТВ — для районов с влажным тропическим климатом;
- ТС — для районов с сухим тропическим климатом;
- Т_в — для районов как с сухим, так и влажным тропическим климатом;
- О — для всех районов на суше (общеклиматическое использование).

Для эксплуатации на морских судах

- М — для районов с умеренно холодным морским климатом;
- ТМ — для районов с тропическим морским климатом, для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в тропической зоне;
- ОМ — для неограниченного района плавания;
- В — для всех районов на суше и на море.

В табл. 4-2 в обобщенной форме приведены значения относительной влажности внешней среды, отражающие реальные условия эксплуатации, и соответствующие им степени жесткости для

элементов, используемых для внутреннего монтажа в аппаратуре, конструктивное оформление которой исключает возможность конденсации влаги на этих элементах. При более высоких температурах, чем указано в табл. 4-2, относительная влажность будет ниже.

В табл. 4-3 показана связь между степенями жесткости по влажности воздуха и климатическим исполнением изделий.

Таблица 4-2

Степени жесткости и максимальные значения относительной влажности при указанных температурах без конденсации влаги

Максимальные значения влажности, %, при температуре, °C	Среднемесячные значения влажности, %, при температуре, °C	Продолжительность воздействия в течение года, мес	Степени жесткости
80 (25)	65 (20)	12	I
98 (25)	80 (20)	2	II
		6	III, IV
98 (25)	90 (20)	12	V
98 (35)	80 (27)	3	VI
		12	VII
98 (35)	90 (27)	12	VIII

Ряд технических документов на конденсаторы допускает их эксплуатацию в условиях относительной влажности до 98% при температуре до 40°C. Однако при одновременном воздействии повышенной влажности и электрической нагрузки вероятность отказов конденсаторов увеличивается. Повышенная влажность среды, в которой эксплуатируется конденсатор, вызывает коррозию металлических частей, способствует развитию микроорганизмов — грибов, плесени, повышает ток утечки, снижая сопротивление изоляции, увеличивает потери в конденсаторе и снижает электрическую прочность. Наличие в атмосфере сернистых, азотистых соединений значительно увеличивает разрушительные свойства влаги.

Хотя практически все конденсаторы в той или иной степени защищены от воздействия влаги покрытием лаком, эмалью, компаундом, уплотнением торцов корпуса резиновыми прокладками или эпоксидными компаундами, опрессовкой пластмассой, лужением и серебрением выводов, в течение всего гарантируемого срока службы и хранения при повышенной влажности могут работать только конденсаторы с вакуумплотной герметизацией, такие как К75-10, К72П-6, К73П-2, К40У-5, К40У-9, КСГ, СГМ. Почти не ухудшают свои параметры в условиях повышенной влажности фторопластовые конденсаторы (К72) из-за исключительно высокой влагостойко-

Таблица 4-3

Связь между степенями жесткости по влажности воздуха и климатическим исполнением изделий

Степень жесткости по влажности воздуха	Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69			Старое обозначение категорий размещений
	Климатическое исполнение	Категория размещения	Характеристика категории размещения	
I	У, Х	4; 4,1; 4,2	Для работы в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, в закрытых, отапливаемых и вентилируемых производственных помещениях)	П
	ТС	2; 3	Для работы в закрытых помещениях без искусственно регулируемых климатических условий; в кожухе комплектного устройства (аппаратуры), под навесом	Н
	ТС	1	Для работы на открытом воздухе	А
II	У, ХЛ	1,1	Переносные изделия для кратковременной работы на открытом воздухе	—
III	У, ХЛ	3	Для работы в помещениях без искусственно регулируемых климатических условий и несущественными колебаниями температуры и влажности	Н
IV	У, ХЛ	1; 2	Для работы на открытом воздухе; в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе; в кожухе аппаратуры (комплектного устройства), предназначенной для работы на открытом воздухе	А, Н

Продолжение табл. 4-3

Степень жесткости по влажности воздуха	Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69			Старое обозначение категорий размещения
	Климатическое исполнение	Категория размещения	Характеристика категории размещения	
V	У, ХЛ	5	Для работы в помещениях с повышенной влажностью, в том числе в подвалах, неветилируемых, неветилируемых подземных, некоторых судовых, некоторых производственных	—
VI	Т, ТВ, ТМ	4, 2	Для работы в помещениях лабораторного типа, капитальных жилых и т. п.	П
	М	3; 4	Для работы в помещениях	П
VII	Т, ТВ, ТМ	3; 4	Для работы в помещениях без искусственно регулируемых климатических условий с незначительными колебаниями температуры и влажности; в отапливаемых (или охлаждаемых) и вентилируемых помещениях	Н, П
	М	1; 2	Для работы на открытом воздухе или под навесом	А, Н
VIII	Т, ТВ, ТМ	1; 2; 5	Для работы на открытом воздухе, под навесом в помещениях без искусственно регулируемых климатических условий, в кожухе комплектного изделия, предназначенного для работы на открытом воздухе, во влажных помещениях	А, Н

сти диэлектрика. Наименее влагостойкими являются негерметизированные бумажные и металlobумажные конденсаторы, так как бумага, даже пропитанная специальными составами, весьма гигроскопична. Низкую влагостойкость имеют и слюдяные конденсаторы. Среди керамических конденсаторов наиболее высокую влагостойкость имеют изолированные конденсаторы, диэлектрик которых защищен от влаги достаточно толстым защитным слоем (например, К10-23, К10-17 вариант а). Влагостойкость керамических неизолированных конденсаторов (например, КТ-1, КТ-2, К10-7В и т. д.) невысока.

При необходимости применения конденсаторов в условиях повышенной влажности приходится снижать электрическую нагрузку, уменьшать предельно допустимую температуру окружающей среды и уменьшать время работы. К сожалению, конкретные данные о необходимой степени снижения нагрузок на конденсаторы при их эксплуатации во влажной среде в настоящее время отсутствуют. При применении негерметизированных конденсаторов в аппаратуре повышенной надежности, предназначенной для эксплуатации во влажных условиях, следует применять меры дополнительной влагозащиты. Наиболее эффективной является герметизация аппаратуры или ее блоков. При герметизации предварительно снижают содержание влаги в деталях и блоках аппаратуры путем сушки и прогрева. Чтобы в герметизированном объеме при снижении окружающей температуры влажность не повышалась до опасных значений, внутри него помещают влагопоглощающие вещества, например силикагель.

В условиях тропического и субтропического климата вредное действие высокой влажности усиливает наличие в атмосфере спор плесневых грибов. Растущая на поверхности конденсаторов плесень, выделяя гидролизующие окислительно-восстановительные ферменты, разрушают защитное покрытие.

Колонии плесени могут расти как на поверхности защитного покрытия, так внутри покрытия и под ним. Плесневые грибы приводят к потере эластичности покрытия, ухудшают его адгезионную способность и существенно изменяют изоляционные свойства органических материалов.

Защитные покрытия конденсаторов, предназначенных для эксплуатации в тропическом климате, выполняются из материалов, устойчивых к росту плесневых грибов. Испытание на грибоустойчивость проводят при температуре $29 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $95 \pm 3\%$. Оценка устойчивости производится по пятибальной системе через 30 сут после заражения спорами грибов:

- 0 — рост грибов отсутствует, на поверхности конденсаторов при 56-кратном увеличении микроскопа грибов не наблюдается;
- 1 — очень слабый рост грибов, на испытуемых конденсаторах при 56-кратном увеличении микроскопа видны единичные проросшие споры;
- 2 — слабый рост грибов, на испытуемых конденсаторах при 56-кратном увеличении микроскопа наблюдается слабый рост мицелия и может наблюдаться единичное спороношение;
- 3 — умеренный рост грибов, на конденсаторах невооруженным глазом видны очаги плесени;
- 4 — обильный рост грибов, невооруженным глазом видно сплошное поражение грибами поверхности конденсатора.

Для тропических вариантов конденсаторов рост грибов не должен превышать балла 1 в отдельных случаях — балла 2. В аппаратуре, предназначенной для эксплуатации в тропическом и субтропическом климате, должны применяться только конденсаторы в тропическом исполнении, а применяемые для дополнительной влагозащиты покрытия должны иметь соответствующую грибоустойчивость. Следует отметить, что даже для материалов с достаточной грибоустойчивостью последняя может быть существенно ослаблена при нарушении технологии нанесения покрытий (например, из-за снижения температуры сушки).

Тепловое воздействие на конденсаторы может быть как непрерывным (в установившемся режиме работы электронной аппаратуры в помещении с постоянной температурой), так и периодическим (при суточном изменении температуры окружающей среды, в процессе прогрева аппаратуры при повторных включениях) или аperiodическим (при перемещении аппаратуры в среде с различными значениями температур).

С повышением температуры существенно ускоряются процессы старения в конденсаторах, увеличивается тангенс угла потерь, снижается электрическая прочность, сопротивление изоляции и начальное напряжение возникновения ионизации. Для герметизированных конденсаторов повышение температуры может вызвать нарушение герметичности.

Оценим для выпускаемых промышленностью конденсаторов допустимые при эксплуатации температурные интервалы.

Технические условия и стандарты на конденсаторы устанавливают допустимые интервалы рабочих температур. Для каждого типа конденсаторов (по виду диэлектрика) в зависимости от конструктивных особенностей, состава диэлектрика, пропиточного материала и т. д. обычно имеется несколько допустимых температурных интервалов, которые приведены в табл. 4-4. Традиционно сложилось, что минимальной температурой, при которой эксплуатируется электронная аппаратура, считалась -60°C и эта величина устанавливалась в качестве минимально допустимой для большинства конденсаторов. В последнее время конденсаторы стали применяться и при значительно меньших температурах. Основным фактором, ограничивающим применение конденсаторов при низких температурах, является изменение емкости. Проведенные исследования показали [30], что ряд конденсаторов может эксплуатироваться и при температурах ниже -60°C (до -180°C). При этом наименьший уход емкости наблюдается у полистирольных, фторопластовых и слюдяных конденсаторов. При температуре -180°C наблюдается увеличение емкости до 2% от значения при 20°C для полистирольных и фторопластовых и изменение емкости не более $\pm 1\%$ для слюдяных (СГМ, КСО, КЗ1У-3) конденсаторов.

У керамических и стеклокерамических конденсаторов типа 1 емкость при температурах до -180°C изменяется примерно соответственно значениям температурного коэффициента емкости, рассчитанного для более высоких температур.

При температуре -180°C могут быть использованы с учетом снижения емкости бумажные (КБГ, БГТ, К40У-9), металлобумажные (МБМ, МБГО, МБГП, К42-4, К42-У2), танталовые и ниобиевые оксиднополупроводниковые конденсаторы, уменьшение емкости которых при указанной температуре составляет около 30—32%, а также комбинированные (полиэтилентерефталат + бумага) и лакопле-

Таблица 4-4

Интервалы допустимых (по ГОСТ и ТУ) рабочих температур конденсаторов

Тип конденсаторов	Интервал температур, °С	Примеры
Вакуумные	От -60 до +70 От -60 до +85 От -60 до +125 От -60 до +200	В, КВ К61-6, К61-7 К61-4, К61-5 К61-9
Керамические	От -25 до +85 От -60 до +100 От -60 до +125 От -60 до +155	КЛС, КТП КТ-1Е, КТПЕ К10-17 (тип 1) КМ-6 (тип 1)
Стеклянные	От -60 до +100 От -60 до +155 От -60 до +200 От -60 до +300	К21-5 К21-7, К21-8 К21У-3 К21У-1
Стеклсэмалевые	От -60 до +100 От -60 до +155	ДС, КС-3 КС-4
Стеклокерамические	От -60 до +85 От -60 до +100 От -60 до +125 От -60 до +155 От -60 до +200	К22У-1, СН30 СКМ-2 (Н30) К22У-1 (М330) СКМ-2 (МПО) СКМ-Т
Слюдяные	От -60 до +70 От -60 до +85 От -60 до +155 От -60 до +200 От -60 до +500	КСГ, КСО СГМ КСОТ КСОТ-200 К31П-1
Бумажные	От -60 до +50 От -60 до +70 От -60 до +85 От -60 до +100 От -60 до +125	К40-11 БМ К40У-5 БМТ К40У-9 К41-1
Металлобумажные	От 0 до +35 От -60 до +60 От -60 до +70 От -60 до +100	К42Ч-6 МБГВ МБГИ, МБГII К42-4 (А)

Продолжение табл. 4-4

Тип конденсатора	Интервал температур, °С	Примеры
Полистирольные	От -40 до +55 От -60 до +60 От -60 до +70 От -60 до +85 От -60 до +100	К70-3 К70-7 ПМ-2 К71-4 К71-3
Фторопластовые	От -50 до +60 От -60 до +155 От -60 до +200	ФЧ ФГТИ К72П-3, К72П-6
Полиэтиленерефталатные	От -60 до +50 От -60 до +70 От -60 до +85 От -60 до +100 От -60 до +125	К73-6 К73П-4 ПМГП К73-9 К73П-2, К73-5
Комбинированные	От -60 до +100 От -60 до +125	К75-10, К75-21 К75-24
Лакопленочные	От -60 до +70 От -60 до +85	К76П-1, К76-4 К76-2, К76-3
Оксиднополупроводниковые	От -80 до +85 От -80 до +125 От -60 до +85 От -60 до +125	К53-1 К53-1А К53-4, К53-7 К53-6А
Электролитические танталовые объемнопористые	От -60 до +85 От -60 до +100 От -60 до +155 От -60 до +200	К52-1 ЭТО-С ЭТО (Б) ЭТО (А)
Электролитические алюминиевые	От -10 до +60 От -10 до +70 От -20 до +50 От -20 до +60 От -20 до +70 От -40 до +60 От -40 до +70 От -40 до +100 От -60 до +60 От -60 до +70 От -60 до +85	К50-7 К50-7 ЭМИ К50-9 К50-12 ЭГЦ (М) К50-3 К50-3А ЭГЦ (ОМ) ЭМ (ОМ) К50-15
Оксиднометаллические	От -60 до +300	К54-2

ночные конденсаторы, уменьшающие свою емкость при этой температуре примерно на 20%. Электролитические конденсаторы при температурах ниже указанных в табл. 4-4 не работоспособны. У конденсаторов с уплотнением резиновыми прокладками и эпоксидным компаундом при очень низких температурах может необратимо ухудшаться качество уплотнения. Иногда наблюдаются отказы при низких температурах у высоковольтных герметизированных конденсаторов. Так, например, у конденсаторов ПКПИ при температуре -60°C происходит усадка пакета и пропитывающего состава, что вызывает образование внутри конденсатора полостей с пониженным давлением, приводит к удалению масла из складок, образующихся при намотке секции

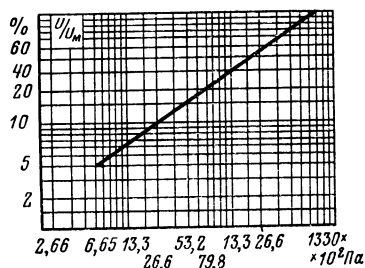


Рис. 4-2. Зависимость допустимого напряжения (в % от номинального) конденсаторов К15У от давления окружающей воздуха.

и оголяет торец обкладки. Резкая неоднородность электрического поля и отсутствие масляной изоляции у торца обкладки конденсатора способствуют развитию поверхностного разряда с обкладки на корпус и создают неустойчивую работу конденсатора.

В некоторых случаях большое влияние на эксплуатационные характеристики конденсаторов оказывают давление и газовый состав окружающей среды. Понижение атмосферного давления уменьшает напряжение разряда по поверхности конденсатора и ухудшает конвекционный теплоотвод, вследствие чего в отдельных случаях возникает необходимость снижения рабочих напряжений и реактивной мощности по отношению к номинальным значениям. Для примера на рис. 4-2 приведена зависимость допускаемого рабочего напряжения конденсаторов К15У от давления окружающей воздуха. При особо низком давлении может происходить испарение жидких и консистентных, а также сублимация твердых материалов. При наличии в аппаратуре в незащищенном виде металлов с высоким давлением паров (например, кадмия, магния, цинка), часто применяемых для гальванических покрытий, сублимация и осаждение частиц этих металлов на холодные поверхности конденсаторов могут вызвать снижение сопротивления изоляции, закорачивание конденсаторов или способствовать поверхностному разряду.

Разрушительное действие на конденсаторы с палладиевыми обкладками оказывает присутствие в окружающей среде водорода. Так как один объем палладия может поглотить до 900 объемов водорода, то это приводит к большим изменениям емкости и механическому разрушению конденсатора.

Применение конденсаторов с палладиевыми электродами, например КМ, К10-9 в аппаратуре, где может выделяться водород даже в очень малых количествах, например из подвергавшихся гальванической обработке металлических деталей, является недопустимым. В этом случае целесообразно применять конденсаторы с другими обкладками, например КМ с платиновыми обкладками (КМ·С) К10-9С, К10-9Н30.

4-2. УСТОЙЧИВОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ К ВНЕШНИМ МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Радиоэлектронная аппаратура, в которой применяются конденсаторы, часто подвергается воздействию механических нагрузок. Механические воздействия на конденсаторы могут быть сравнительно невелики при амортизации аппаратуры или отдельных ее блоков или превосходить нагрузки, которым подвергается аппаратура, если механические резонансные частоты конденсаторов совпадают с частотой внешней вибрации.

Механические нагрузки обычно подразделяют на три основных вида: вибрацию, удары и линейные (центробежные) нагрузки. Вибрация может быть периодической, непериодической или состоять из ряда затухающих колебаний.

Вибрационные нагрузки, возникающие в аппаратуре, имеют случайный характер и проявляются в широкой полосе частот. Величины этих нагрузок можно охарактеризовать достаточно полно только с помощью статистических параметров. Однако провести статистическую оценку вибропрочности реальных типов конденсаторов практически не представляется возможным. Поэтому для субъективной характеристики условий эксплуатации и испытаний на вибрацию используют такие параметры, как частота вибрации, амплитуда колебаний и ускорение. Для синусоидальной периодической вибрации связь между этими характеристиками выражается соотношением

$$G = \frac{X_0 f^2}{25,48}, \quad (4-1)$$

где G — ускорение вибрации, м/с^2 ; X_0 — амплитуда, мм ; f — частота, Гц .

Наиболее часто вибрации подвергается аппаратура, размещенная на средствах передвижения. Как правило, вибрацию аппаратуры вызывает несколько разных источников и форма вибрации имеет сложный характер.

Ударом называют совокупность явлений, возникающих при внезапном приложении к телу внешних сил или при воздействии двух движущихся друг относительно друга тел с момента их соприкосновения, связанных со значительным изменением скоростей тел за очень короткий промежуток времени.

Удар характеризуется максимальным ускорением ударного импульса W_0 , его формой и длительностью τ . Для синусоидальной формы ударного импульса эти параметры связаны между собой зависимостью

$$W = W_0 \sin \frac{\pi}{\tau} t, \quad (4-2)$$

где W — ударное ускорение; t — время воздействия.

Величина τ называется иногда временем нарастания ударного импульса. Различают одиночные и многократные удары. Одиночные удары, как правило, характеризуются короткой длительностью импульса (0,2—5 мкс) и большим ускорением (1470—9800 м/с^2 и более). Многократным ударам присущи большие длительности (1—10 мкс).

Таблица 4-5

Виды механических воздействий и значения их характеристик по степеням жесткости

Воздействующие факторы	Значения характеристик			Степень жесткости
	диапазон частот, Гц	максимальное ускорение, м/с²	длительность удара, мс	
Вибрационные нагрузки	1—35	4,91	—	I
	1—60	9,81	—	II
	1—60	19,6	—	III
	1—80	49,1	—	IV
	1—100	9,81	—	V
	1—200	49,1	—	VI
	1—200	98,1	—	VII
	1—600	49,1	—	VIII
	1—600	98,1	—	IX
	1—1000	98,1	—	X
	1—2000	49,1	—	XI
	1—2000	98,1	—	XII
	1—2000	147	—	XIII
	1—2000	196	—	XIV
	1—3000	196	—	XV
	1—5000	98,1	—	XVI
	1—5000	196	—	XVII
	1—5000	294	—	XVIII
	1—5000	392	—	XIX
	100—5000	392	—	XX
Ударные нагрузки многократные	—	147	2—15	I
	—	392	2—10	II
	—	735	2—6	III
	—	1471	1—3	IV
Одиночные	—	39,2	40—60	I
	—	196	20—50	II
	—	735	2—6	III
	—	1471	1—3	IV
	—	4905	1—2	V
	—	9810	0,2—1	VI
	—	14 710	0,2—0,5	VII
	—	29 400	0,2—0,5	VIII
Линейные (центробежные) нагрузки	—	98,1	—	I
	—	245	—	II
	—	491	—	III
	—	981	—	IV
	—	1471	—	V
	—	1962	—	VI
	—	4905	—	VII

Линейная нагрузка имеет однонаправленный характер. Центробежное ускорение может быть определено по формуле

$$G = 4\pi^2 l n^2, \quad (4-3)$$

где G — ускорение, м/с^2 ; l — длина плеча от центра вращения до геометрического центра конденсатора, м ; n — число оборотов в секунду.

Технические условия на конденсаторы содержат сведения о допустимых для эксплуатации конденсаторов величинах механических нагрузок. Эти данные часто дифференцируются в зависимости от времени воздействия механических нагрузок и способов крепления конденсаторов, а величина ускорения при ударах указывается одновременно с максимально допускаемым числом ударов.

В соответствии с ГОСТ 16962-71 для изделий электронной техники, в том числе и для конденсаторов, устанавливаются соответствующие значения механических воздействий, которые приведены в табл. 4-5, в обобщенной форме отражающие условия эксплуатации. Приведенные в табл. 4-5 степени жесткости XVI—XX по вибрационным нагрузкам устанавливаются для изделий миниатюрных и сверхминиатюрных конструкций. Испытания конденсаторов на ударную прочность проводят с общим количеством многократных ударов равным 10 000 для степеней жесткости I, II, 4000 — для степеней жесткости III, IV и равным девяти для одиночных ударов.

Вибрация вызывает в деталях конденсатора усталостные явления, способствующие нарушению его механической прочности и выходу из строя. Одним из последствий воздействия вибрации может быть полная или частичная потеря конденсатором емкости из-за обрыва вывода или токоподводящих элементов, соединяющих секции конденсатора с общим выводом (для бумажных, пленочных, металлобумажных и металлопленочных конденсаторов), обрыв анода у электролитических объемнопористых и оксиднополупроводниковых конденсаторов, отслоение электродов у керамических конденсаторов. Нарушение из-за воздействия вибрации оксидного слоя электролитических объемнопористых конденсаторов может вызвать существенное увеличение токов утечки. Для расширения диапазона вибрационных нагрузок, в котором может применяться конденсатор, в ряде случаев приходится изменять его конструкцию. Так, например, объемнопористые конденсаторы старой конструкции оказались не пригодными для применения в блоках радиоэлектронной аппаратуры, где предъявляются требования к стабильности тока утечки при воздействии вибрации выше 600 Гц с ускорением $98,1 \text{ м/с}^2$. Новые области применения танталовых конденсаторов потребовали от разработчиков конденсаторов их модернизации. В результате были доработаны и освоены в производстве конденсаторы К52-2 и К52-3, обладающие значительно более высокой устойчивостью к воздействиям вибрации, ударов и линейного ускорения за счет сварки анодной таблетки с крышкой в трех точках вместо консольной подвески, применявшейся в конденсаторах ранее. При новом конструктивном исполнении крепления анодной таблетки исключается возрастание тока утечки при работе конденсаторов в диапазоне частот вибраций от 5 до 2500 Гц при ускорении $196,2 \text{ м/с}^2$.

Воздействие вибрации на подстроечные конденсаторы полупеременной емкости может вызывать как необратимые, так и обратимые изменения емкости, приводящие к изменению частот настроенных контуров, в которых работают эти конденсаторы. К необратимым

Таблица 4-6

Критические условия вибрации для некоторых подстроечных конденсаторов

Диэлектрик	Тип конденсатора	Частотные участки с повышенной чувствительностью к вибрации, Гц	Критическое ускорение вибрации, м/с²
Керамический	КПК-1	455—465 890—910 1450—1550 1750—1850 2350—2450 2700—2800 4250—4350	98,1
Керамический	КПК-2	150—170 300—320 650—750 740—760 1230—1260 3300—3500 4400—4600	196,2
Керамический	КПК-3 КПК-5	390—410 1000—1400 1600—1800 4900—5100	196,2
Керамический	КПК-М	850—1000 1080—1120 1420—1550 1650—1750	Менее 49,1
Керамический	КПК-МТ	500—530 580—620 880—920 1000—1100 1600—1800 2200—2300 2400—2600 4800—5200	Менее 49,1
Керамический	ММКТ	780—820 1500—1600 4400—4600	196,2
Воздушный	КТ-2	20—50 840—1050 2200—2500 3300—3500 4500—4800	49,1
Воздушный	КПВ	400—500 800—900 1050—1200 1600—1750	Менее 19,6

изменениям емкости приводит возникающий в процессе вибрации сдвиг ротора конденсатора относительно статора, к обратимым — изменение расстояния между обкладками с частотой вибрации. Максимальное изменение емкости происходит при совпадении частоты вибрации с частотой собственного резонанса конструкции конденсатора. До некоторого критического значения ускорения изменение емкости будет носить обратный характер, при превышении некоторого критического значения ускорения изменение емкости остается и после прекращения действия вибрационных нагрузок.

Проведенные испытания показывают, что полупеременные конденсаторы, как правило, имеют в диапазоне вибрационных частот несколько основных резонансов, при которых изменение емкости достигает довольно больших значений, а критическое ускорение относительно мало. На частотах, кратных частоте основного резонанса, изменение емкости меньше и уменьшается по мере удаления от частоты основного резонанса. При наличии в спектре частот, воздействующих на аппаратуру, содержащую подстроечные конденсаторы, частот близких к основной резонансной частоте конденсатора, приходится снижать максимально допустимое значение ускорения. В табл. 4-6 представлены частотные участки, близкие к основным резонансам, и критические ускорения вибрации для некоторых типов широко применяемых в радиоэлектронной аппаратуре подстроечных конденсаторов.

Таблица 4-7

Допустимые вибрационные нагрузки для некоторых подстроечных конденсаторов

Тип конденсатора	Диапазон частот вибрации, Гц	Ускорение до, м/с ²
КПК-1	20—5000	49,1
КПК-2	20—5000	98,1
КПК-3, КПК-5	20—5000	98,1
КПК-М	20—800	98,1
КПК-МТ	20—400	98,1
ММКТ	20—5000	196,2
КТ (воздушный)	20—600	98,1
КПВ (воздушный)	20—300	98,1

В табл. 4-7 указаны рекомендуемые значения допустимых вибрационных нагрузок для некоторых подстроечных конденсаторов.

Нагрузка на конденсатор при вибрации достигает максимально-го значения при совпадении частоты вибрации с собственной резонансной частотой конденсатора. Для предотвращения повреждений конденсаторов, крепящихся в аппаратуре пайкой за выводы, целесообразно ограничивать верхнее значение возможных вибрационных частот половиной собственной резонансной частоты конденсатора. Собственные частоты конденсаторов обычно определяют экспериментальным путем. Их значения зависят от длины выводов при креплении (чем больше расстояние от места пайки до корпуса конденсатора, тем ниже его собственная частота), диаметра выводов и массы конденсатора.

В аппаратуре конденсаторы с проволочными выводами обычно крепят способами, схематично изображенными на рис. 4-3.

Полученные экспериментально зависимости резонансных частот конденсаторов КТ-2 от длины выводов от корпуса до места пайки приведены на рис. 4-4. Эти зависимости представляют собой прямые, соответствующие выражению

$$\lg f = \lg m - n \lg L, \quad (4-4)$$

где f — собственная частота вибрации, Гц; L — длина вывода до места пайки, мм; m , n — постоянные коэффициенты.

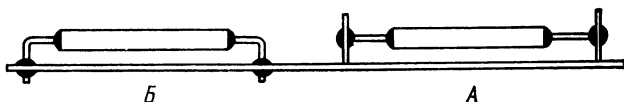


Рис. 4-3. Способы крепления конденсаторов.

А — закрепляемый конец вывода расположен параллельно оси трубки или плоскости конденсатора; Б — закрепляемый конец вывода расположен перпендикулярно оси трубки или плоскости конденсатора.

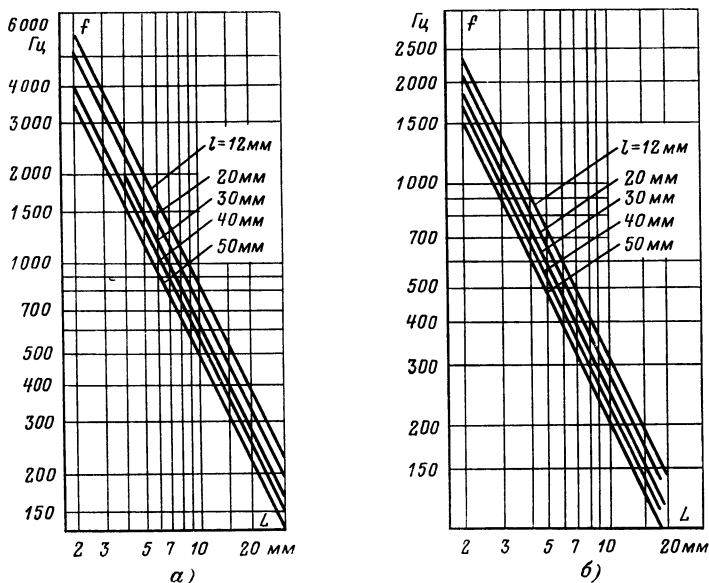


Рис. 4-4. Зависимость резонансных частот конденсаторов типа КТ-2 от длины выводов от корпуса до места пайки при креплении.

а — способом А; б — способом Б.

Подобные зависимости были установлены и для конденсаторов некоторых других типов. Воспользовавшись значениями коэффициентов m и n , приведенным в табл. 4-8, можно определить в соответствии с (4-4) резонансные частоты при различных расстояниях от корпуса до места пайки в зависимости от варианта крепления.

Значения коэффициентов m и n при различных способах крепления конденсаторов

Тип конденсатора	Способ крепления	Размеры конденсатора, мм	Коэффициент m	Среднее значение коэффициента n
КТ-2 вариант a	А	$l = \begin{cases} 12 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \end{cases}$	15 200 12 900 11 100 10 500 9400	1,25
	Б	$l = \begin{cases} 12 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \end{cases}$	6590 5780 5090 4590 4300	1,30
КТ-1 вариант a	А	$l = \begin{cases} 10 \\ 12 \\ 16 \\ 20 \end{cases}$	16 100 14 500 13 500 12 400	1,25
КМ-5		$\begin{matrix} 6 \times 6 \\ 8 \times 8 \\ 10 \times 10 \\ 12 \times 12 \end{matrix}$	10 000 12 300 8900 8900	1,10
КТ-2 с ленточными выводами	А	$l = \begin{cases} 12 \\ 20 \\ 40 \end{cases}$	7100 4860 4560	1,20
КД-2 вариант a	А	$d = \begin{cases} 8 \\ 10 \\ 16 \\ 12 \end{cases}$	6700 10 700 4800 6400	1,15 1,10
	Б	$d = \begin{cases} 8 \\ 10 \\ 16 \end{cases}$	5200 2600 6800	1,30
КД-1 вариант a	А Б	$d = 4$	9700 4550	1,10
КСО-1	А	—	8700	1,20
	Б	—	5600	1,30
КСО-2	А	—	7700	1,20
	Б	—	4800	1,30

Тип конденсатора	Способ крепления	Размеры конденсатора, мм	Коэффициент m	Среднее значение коэффициента n
КСО-5	А	—	6900	1,20
	Б	—	4000	1,30
БМТ-1	А	—	3700	1,02
БМТ-2	А		2500	
БМ-1	А		6000	1,3
БМ-2			21 900	
КБГ-И, корпус 1	А	—	12 500	1,20
	Б	—	5300	1,30
КБГ-И, корпус 2, 3	А	—	11 700	1,20
	Б	—	5250	1,30
КБГ-И, корпус 4	А	—	10 600	1,20
	Б	—	3000	1,30
КБГ-И, корпус 5	А	—	5200	1,20
	Б	—	1500	1,30
КБГ-И, корпус 6	А	—	4000	1,20
	Б	—	1120	1,30
К53-1, К53-1А, К53-4, К53-18	А	$d = 4$ $l = 13$	8000	1,15

Примечание. Значения коэффициентов m и n соответствуют изменению L от 1 до 30 мм.

При ударах в конденсаторе так же могут возбуждаться затухающие неустановившиеся колебания. Близкие совпадения частоты этих колебаний с собственной частотой конденсатора могут вызывать его отказ по указанным выше причинам.

Резонансные колебания могут возбуждаться при условии

$$\tau/T_0 = 0,3 \div 1,2, \quad (4-5)$$

где T_0 — период собственных колебаний конденсатора.

Возможность применения конденсаторов в условиях воздействия ударных нагрузок определяется обычно экспериментальным путем, а допустимая величина ускорения и число ударов указывается в технических условиях.

Линейная нагрузка не вызывает собственных колебаний и, как правило, не вызывает отказов конденсаторов. Исключением являются крупногабаритные герметизированные конденсаторы, например

К41-1, для которых наблюдались случаи нарушения герметичности при линейных нагрузках в 980—1470 м/с².

Если механические усилия, действующие на конденсатор в аппаратуре, превосходят величины, допустимые при креплении за выводы, то рекомендуется крепление за корпус, заливка или приклеивание к плате. Эти способы предотвращают перемещение конденсатора относительно платы и исключают механический резонанс конденсатора.

При монтаже конденсаторов необходимо учитывать, что пайка обычно разрешается на расстоянии не менее 5 мм от корпуса. Несоблюдение этого правила ведет к снижению механической прочности контактного узла конденсатора, а в отдельных случаях снижает его влагустойчивость. Технические условия также регламентируют минимальное расстояние от корпуса конденсатора, на котором можно производить изгиб вывода. Оба вывода от корпуса конденсатора до места изгиба (или пайки) должны, по возможности, иметь одинаковую длину; радиус изгиба выводов должен быть не меньше их удвоенной толщины. Однако при необходимости изгиб и пайку можно производить и при меньших расстояниях от корпуса, чем указано в технических условиях. При этом контактный узел и покрытие конденсатора должны быть надежно защищены от повреждений специальными приспособлениями, устраняющими передачу на контактные узлы механических усилий и создающими эффективный теплоотвод.

4.3. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ КОНДЕНСАТОРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Применение радиоэлектронной аппаратуры для космических аппаратов, атомных реакторов, ускорителей и т. д. сделало весьма актуальными вопросы радиационной стойкости электрорадиоэлементов, в том числе и конденсаторов.

Под ионизирующим излучением понимают любое излучение, воздействие которого с веществом приводит к образованию зарядов различных знаков [31]. В результате воздействия ионизирующих излучений в конденсаторах могут возникнуть радиационные повреждения, приводящие к временным или остаточным изменениям их электрических параметров [32, 33]. Временные (обратимые) изменения наступают в конденсаторах одновременно с началом облучения и практически исчезают после его прекращения. Остаточные (необратимые) изменения после прекращения облучения сохраняются частично или полностью. Возможно сочетание временных и постоянных изменений. Степень воздействия ионизирующих излучений на конденсаторы при заданном режиме электрической нагрузки зависит от вида излучения, дозы или потока, распределения энергии радиации по спектру, вида диэлектрика, конструкции конденсатора, технологии его изготовления и окружающих условий (температуры, давления, влажности и т. д.). Изменения в конденсаторах вызывают заряженные ядерные частицы с высокой энергией (электроны, протоны, α -частицы, заряженные осколки деления), γ -лучи, нейтроны. Заряженные ядерные частицы, проходя через корпус или диэлектрик конденсатора, теряют большую часть своей энергии и вызывают ионизацию и возбуждение электронов. Образовавшиеся при этом электроны высоких энергий могут произвести дальнейшую ионизацию материала. Так как заряженные частицы имеют неболь-

шую длину свободного пробега, то они способны вызывать ионизацию конденсатора только на небольшом расстоянии от поверхности.

Гамма-лучи обладают высокой проникающей способностью и вызывают как поверхностные, так и распределенные по всему объему изменения. В результате воздействия гамма-лучей на конденсаторы происходит поглощение и рассеяние гамма-квантов. У гамма-квантов с энергией до 10 МэВ наблюдаются три вида взаимодействия с веществом: фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект), комптоновское рассеяние (комpton-эффект) и эффект образования электроннопозитронных пар [32]. При фотоэффекте гамма-квант поглощается атомом, а энергия гамма-кванта расходуется на сообщение электрону атома дополнительной скорости и преодоление энергии связи электрона в атоме.

При комптоновском рассеянии гамма-квантов на электронах гамма-кванты теряют часть своей энергии и изменяют направления движения; энергия, переданная электрону, расходуется на отрыв электрона от атома и сообщения ему кинетической энергии. В результате взаимодействия гамма-квантов с кулоновским полем ядра гамма-квант теряет свою энергию с образованием пары частиц позитрон — электрон. Энергия электронов, образующихся в результате фотоэффекта, комптон-эффекта и эффекта образования пар, расходуется на ионизацию и возбуждение атомов и молекул, а также на повышение температуры вещества. Под действием гамма-квантов возможны также атомные смещения в диэлектрике за счет превращения энергии электронного возбуждения в энергию смещения. Быстрые нейтроны вызывают ионизацию косвенным путем: испытавший соударение атом расходует полученную от нейтрона энергию на акты ионизации до тех пор, пока его энергия не уменьшится до порогового значения.

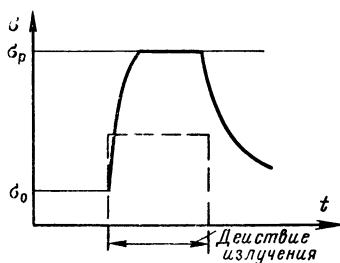


Рис. 4-5. Характер временного изменения удельной проводимости диэлектриков под действием гамма-излучения.

Временные радиационные эффекты приводят к резкому снижению сопротивления изоляции и увеличению токов утечки вследствие образования поверхностных и внутренних объемно-распределенных зарядов. На изменение емкости и $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов временные радиационные эффекты практически не сказываются.

На рис. 4-5 показан характер временного изменения удельной проводимости диэлектриков под действием гамма-излучения [15]. С начала действия гамма-излучения проводимость во времени возрастает до насыщения. Рост проводимости может быть описан выражениями

$$\sigma - \sigma_0 = A_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right); \quad (4-6)$$

$$\tau_0 = K_0 P^{-M},$$

где σ_0 и σ — удельные проводимости до и при воздействии данной мощности излучения; τ_0 — постоянная времени; P_γ — мощность экспозиционной дозы гамма-излучения, рад/с; A_1 , K_0 , M — эмпирические коэффициенты.

Радиационная удельная проводимость диэлектриков может быть оценена по формуле

$$\sigma_{\text{рад}} = \sigma - \sigma_0 = KP_\gamma^\Delta, \quad (4-7)$$

где Δ — параметр диэлектрика; K — коэффициент пропорциональности, зависящий от вида диэлектрика и условий облучения.

В табл. 4-9 приведены значения Δ и K , полученные при импульсных источниках проникающей радиации экспериментально-расчетным путем [15]. После прекращения облучения происходит спад проводимости по гиперболическому закону.

Таблица 4-9

Значения коэффициентов Δ и K для некоторых диэлектриков

Материал	$K \cdot 10^{17}$, Ом ⁻¹ ·см ⁻¹ /Р·с ⁻¹	Δ	Область мощностей дозы, для которых определены K и Δ , Р/с
Керамика	16	0,89	$(5-10) \cdot 10^7$
Стекло	5,5	1	$6 \cdot 10^5-6 \cdot 10^7$
Низкочастотная смола (типа глифталя)	44,4	0,86	$6 \cdot 10^4-4 \cdot 10^7$
Слюда	44	0,88	$3 \cdot 10^5-4 \cdot 10^7$

В конденсаторах с неорганическим диэлектриком в результате воздействия на атомы диэлектрика быстрых частиц (нейтронов, дейтронов, α -частиц, протонов, электронов), обладающих достаточной энергией, в кристаллической решетке могут образоваться дефекты из-за смещения атома со своего положения. Образовавшиеся дефекты термически не стабильны и большинство из них или исчезает, или создает вторичные долгоживущие дефекты. Значительные дефекты смещения вызывают быстрые нейтроны (с энергией более 1 МэВ). Атомы отдачи, участвующие в упругом столкновении с частицей, могут производить вторичные каскады смещений, включающие до сотен смещенных атомов. Вторичные смещения являются весьма стабильными и определяют изменение емкости и $\text{tg } \delta$ после окончания действия радиации, а также изменение механических свойств из-за возникновения дефектов и перекристаллизации материалов.

В конденсаторах с органическими диэлектриками под действием облучения могут проявляться химические радиационные эффекты, приводящие к изменению химического строения диэлектрика. Так, например, в полиэтилене освобождается водород и образуются поперечные связи между соседними полимерными цепями;

в политетрафторэтилене происходит разрыв полимерной цепи с выделением фтора и других продуктов разложения.

Химические радиационные эффекты приводят к резкому уменьшению сопротивления изоляции, изменению емкости, увеличению потерь. Вызванные химическими радиационными эффектами ухудшения параметров конденсаторов, в основном, являются необратимыми. Наиболее стойкими к облучению из органических веществ, применяемых в конденсаторостроении, являются полистирол и полиэтилен. Существенного ухудшения электрических свойств этих материалов можно ожидать при интегральных дозах по γ -излучению, больших чем $5 \cdot 10^6$ Дж/кг для полистирола и 10^6 Дж/кг для полиэтилена.

Неорганические материалы (керамика, стекло и др.) менее чувствительны к воздействию радиации, чем органические материалы.

В табл. 4-10 приведены допустимые дозы облучения для некоторых диэлектриков [32].

Таблица 4-10

Допустимые дозы облучения для некоторых диэлектриков

Материалы	Доза гамма-облучения, Р	Нейтронный поток, нейтрон/м ²
Керамика (стеатит)	10^{12}	10^{24}
Стекло	$3 \cdot 10^9$	$10^{21} - 10^{22}$
Кварц	10^{10}	10^{23}
Слюда	10^{10}	10^{22}
Полиэтилен	10^8	10^{21}
Ацетат-целлюлоза (бумага)	$5 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^7$	$10^{18} - 10^{19}$
Фенольные смолы с органическим наполнителем	10^8	10^{20}

В результате взаимодействия радиационного излучения с конденсатором происходит частичное преобразование энергии излучения в тепловую. Источниками тепловыделения являются быстрые нейтроны и гамма-излучение. Это обстоятельство, а также возможное изменение емкости и тангенса угла потерь конденсатора изменяют условия теплового равновесия между конденсатором и окружающей средой и могут привести к тепловому пробое диэлектрика.

Вследствие поглощения энергии ядерных излучений в единице объема конденсатора рассеивается мощность [34]

$$Q = 10^{-5} B I, \text{ Вт/см}^3, \quad (4-8)$$

где B — плотность материала, г/см³; I — мощность дозы, Р/с.

Тело с одинаковым тепловыделением по всему объему и с малым перепадом температур нагревается излучением до температуры

$$T_0 = T_A + 10^{-5} \frac{BIV}{\lambda S}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4-9)$$

где T_A — температура окружающего воздуха; $\dot{S}$ — охлаждаемая поверхность, см^2 ; V — объем тела, см^3 ; λ — суммарный коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт/см}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Подсчитанная по указанной формуле температура конденсатора не должна превышать максимально допустимого значения при работе конденсатора на постоянном токе.

Изучение влияния облучения на керамические конденсаторы общего назначения показало, что в большинстве случаев радиационными изменениями в них можно пренебречь. Изменение характеристик этих конденсаторов обусловлены главным образом влиянием температуры. Наблюдающееся снижение емкости в процессе облучения почти полностью исчезает при удалении конденсаторов из зоны облучения [33].

Изучение радиационных эффектов в бумажных конденсаторах показало, что они на два-три порядка более чувствительны к излучению, чем керамические, стеклянные и слюдяные конденсаторы. Изменение емкости, тангенса угла потерь и сопротивления изоляции бумажных конденсаторов под действием радиации превышают допустимые величины. Кроме того, под воздействием облучения из пропиточных материалов часто выделяются газы, в отдельных случаях вызывающие разрушение корпуса конденсатора.

Конденсаторы с органическими диэлектриками (полиэтилен, полистирол, полиэтилентерефталат) примерно в 10 раз более чувствительны к воздействию излучения, чем конденсаторы с неорганическими диэлектриками.

Результаты испытания танталовых и алюминиевых электролитических конденсаторов показали, что они могут выдерживать длительное воздействие облучения. Хотя танталовые конденсаторы обладают большей радиационной стойкостью, чем алюминиевые, их применение создает определенную опасность для обслуживающего персонала, так как тепловые нейтроны вызывают активацию тантала, радиоактивные продукты которого имеют период полураспада 111 дней. Период полураспада Al^{28} значительно меньше (около 2,3 мин), ввиду чего через сравнительно короткое время после облучения алюминиевые конденсаторы уже не представляют особой опасности для обслуживающего персонала.

Следует отметить, что в условиях радиации опасно применение конденсаторов, корпус которых запаян висмутсодержащим припоем, так как под воздействием тепловых нейтронов образуется Bi^{210} , распад которого приводит к образованию весьма токсичного Po^{210} . В процессе облучения емкость танталовых и алюминиевых электролитических конденсаторов может как возрастать, так и уменьшаться. Наблюдается изменение емкости в пределах $-10 \div +25\%$ для танталовых и $-6 \div +65\%$ для алюминиевых конденсаторов.

Заметное ухудшение параметров бумажных конденсаторов наступает при среднем интегральном потоке $T > 2,9$ МэВ, большем чем $2 \cdot 10^{18}$ нейтрон/ м^2 , и средней дозе γ -облучения, большей чем 10^5 Дж/кг, для полиэтилентерефталатных конденсаторов — 2×10^{19} нейтрон/ м^2 и 10^6 Дж/кг; для танталовых конденсаторов — $4 \cdot 10^{17}$ нейтрон/ м^2 и 10^4 Дж/кг соответственно.

НАДЕЖНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

5-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ

Основные определения и термины в области надежности определены ГОСТ 13377-67 [35].

Принятая терминология является общей для разных отраслей промышленности. Для электрических конденсаторов требуются ее конкретизация и дополнение с учетом особенности этих изделий.

Настоящая глава рассчитана на читателя, знакомого с основами теории вероятности, поэтому авторы ограничились пояснением некоторых понятий в области надежности радиодеталей.

Одним из основных понятий теории надежности является понятие *отказ* — событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия. Конденсаторы относятся к *невосстанавливаемым* изделиям. Понятие *невосстанавливаемого* изделия является условным и означает, что изделие в случае отказа не может быть восстановлено или его восстановление является нецелесообразным. Так, например, хотя после некоторых отказов (например, обрыв вывода) конденсатор принципиально может быть восстановлен (припайкой нового вывода), такой ремонт, особенно для относительно дешевых конденсаторов, является нецелесообразным. Полный отказ из-за пробоя диэлектрика делает восстановление конденсатора практически невозможным. Однако для дорогостоящих конденсаторов могут наблюдаться такие отказы, после которых восстановление конденсатора возможно и целесообразно. Из установленных ГОСТ 13377-67 терминов следует выделить группу, относящуюся к свойствам изделий. Для *невосстанавливаемых* изделий в эту группу входят: надежность, безотказность, долговечность, сохраняемость. *Надежностью* изделия называется его свойство выполнять заданные функции при сохранении эксплуатационных показателей в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки, т. е. продолжительности эксплуатации или испытания. Надежность *невосстанавливаемых* изделий обуславливается их безотказностью, сохраняемостью и долговечностью. Основной заданной

функцией конденсатора является его способность накапливать электрические заряды под воздействием электрического поля, сохраняя при этом в установленных пределах основные электрические параметры (емкость, сопротивление изоляции, тангенс угла потерь) при допустимых электрических, механических и климатических нагрузках. Состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными техническими требованиями к изделию, определяется термином *работоспособность*, а состояние, при котором изделие не соответствует хотя бы одному из требований, — «*неисправность*». *Безотказность* изделия — это его свойство сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов. *Долговечность* — свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния, которое определяется невозможностью его дальнейшей эксплуатации, обусловленной либо снижением эффективности, например резким изменением емкости, существенным снижением сопротивления изоляции или увеличением тангенса угла потерь, либо требованиями безопасности.

Терминология, применяемая в области надежности конденсаторов, имеет пока еще некоторые расхождения с ГОСТ 13377-67, но в последнее время приводится в соответствие с его требованиями и определениями. Основными количественными показателями надежности (безотказности) являются вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. *Вероятность безотказной работы* в интервале от 0 до t_0 — это вероятность того, что в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не возникнет отказа изделия

$$P(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} f(t) dt, \quad (5-1)$$

где $f(t)$ — плотность вероятности распределения наработки до отказа.

Статистически $P(t_0)$ определяется как отношение числа исправных элементов $N-d$ за время t_0 к общему числу элементов, исправных в начальный момент времени при $t=0$:

$$P(t_0) = 1 - d(t_0)/N. \quad (5-2)$$

Вероятностью противоположного события является *вероятность отказа*

$$Q(t_0) = 1 - P(t_0). \quad (5-3)$$

Средняя наработка до отказа определяется как

$$\tau = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (5-4)$$

Статистически τ определяется как среднее арифметическое время отказов элементов и определяется выражением

$$\tau = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i. \quad (5-5)$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ — это вероятность отказа изделия в единицу времени после данного момента времени при условии, что отказ до данного момента не возник:

$$\lambda(t) = f(t)/P(t). \quad (5-6)$$

Статистически $\lambda(t)$ определяется как число отказов за промежуток времени от t до $t + \Delta t$, отнесенное к числу элементов, оставшихся исправными к началу рассматриваемого промежутка времени:

$$\lambda(t) \approx \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{\Delta t N(t)}. \quad (5-7)$$

Принято считать, что зависимость интенсивности отказов от времени обычно имеет вид кривой, изображенной на рис. 5-1. На участке *I*, называемом участком приработки, выходят из строя конденсаторы с грубыми технологическими дефектами, не выявленными на стадии производственного контроля. Участок *II* характеризуется пониженным уровнем и примерным постоянством интенсивности отказов и называется участком нормальной эксплуатации. Продолжительность этого участка зависит от средней долговечности конденсаторов и условий эксплуатации. Отказы на нем носят в основном внезапный характер.

На участке *III*, называемом участком старения или износа, наблюдается рост интенсивности отказов, обусловленный процессами старения в конструктивных элементах конденсатора. Однако в чистом виде подобная зависимость на практике почти никогда не наблюдается. Участок приработки для некоторых типов конденсаторов при хорошей постановке контроля может практически отсутствовать, а для других типов — растягиваться до 500—2000 ч.

Участок нормальной эксплуатации присущ почти всем типам конденсаторов, и начало его зависит от величины участка приработки.

Начало участка интенсивного старения, как правило, наступает значительно позже установленных техническими условиями гарантируемых сроков службы (долговечности) конденсаторов. Несмотря на сложный вид зависимости интенсивности отказов конденсаторов от времени, в практике надежности для расчетов часто используют усредненные за определенное время значения λ .

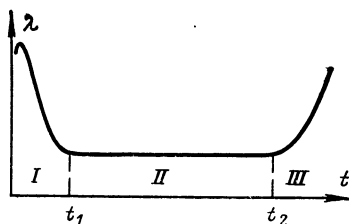


Рис. 5-1. Общий вид зависимости интенсивности отказов от времени.

Таблица 5-1

Интенсивность отказов конденсаторов при номинальном постоянном напряжении и температуре окружающей среды 20°C [37]

Тип конденсатора	$\lambda \cdot 10^5, 1/\text{ч}$	Тип конденсатора	$\lambda \cdot 10^5, 1/\text{ч}$
КБГ-400В	0,2	КЭ	0,65
КБГ-600В	0,25	ЭГЦ	1,5
КБГ-1500В	0,5	ЭМ	0,6
КБГИ	0,12	КСО-1	0,2
КБГМ	0,26	КСО-2	0,2
КБГМ-И	0,24	КСО-5	0,35
КБИ	0,4	КСО-7	0,39
КБГО	0,2	КСО-8	0,6
МБГЧ	0,6	СГМ	0,2
МБГП-200 В	0,2	КПК	0,2
МБГП-400 В	0,2	КТ-1	0,2
МБГП-600 В	0,2	КТ-2	0,2

В табл. 5-1 приведены значения интенсивности отказов некоторых конденсаторов при номинальном напряжении постоянного тока и температуре окружающей среды 20°C, в табл. 5-2 — при предельных рабочих температурах.

Таблица 5-2

Вероятность безотказной работы некоторых типов конденсаторов в номинальном режиме при предельных рабочих температурах (по данным испытаний) [37]

Тип конденсатора	$P_{\text{мин}}$ на 1000 ч	Тип конденсатора	$P_{\text{мин}}$ на 1000 ч
МБГО	0,997	КДУ	0,999
МПГТ	0,993	КВДС	0,997
К73-5	0,993	ПМ	0,967
БМ-2	0,989	МБМ	0,970
КТ-1	0,996	КОБ	0,952
КМ	0,996	КС	0,957
КСО-2	0,99	КСОТ	0,92
КБГ-МН	0,99	КСОТ-5 (500 В)	0,97
КД-2	0,995		

Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов связаны между собой выражением

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (5-8)$$

Количественным показателем долговечности служит *гамма-процентный ресурс* (наработка изделия до предельного состояния, оговоренного в технической документации), который имеет и превышает в среднем обусловленное число γ процентов изделий данного типа.

Как видно из выражений (5-1), (5-6), для вероятностного определения количественных показателей надежности и прогнозирования надежности на какое-либо время t необходимо знание законов распределения наработки до отказа. Для конденсаторов в литературе чаще всего применяется экспоненциальное распределение, реже — нормальное, логарифмическое нормальное или Вейбулла.

В табл. 5-3 показана связь между основными показателями надежности при экспоненциальном распределении наработки до отказа.

Выяснение причин отказов, умение их прогнозирование и классификация отказов являются одним из путей к созданию надежных изделий и разработке совершенных методов испытаний на надежность.

При классификации отказов схемные элементы могут рассматриваться в качестве участка цепи, обладающей в общем случае комплексным сопротивлением, величина которого должна лежать в определенных пределах. Для

Таблица 5-3

Связь основных показателей надежности при экспоненциальном законе распределения [36]

Показатель	Точное значение	Приближенное значение	Погрешность
$P(t_0)$	$e^{-\lambda t_0}$	$1 - \lambda t_0$	$\delta_+ < (\lambda t_0)^2/2$
$Q(t_0)$	$1 - e^{-\lambda t_0}$	λt_0	$\delta_- < (\lambda t_0)^2/2$
$P(x, x + t_0)$	$e^{-\lambda t_0}$	$1 - \lambda t_0$	$\delta_+ < (\lambda t_0)^2/2$
$Q(x, x + t_0)$	$1 - e^{-\lambda t_0}$	λt_0	$\delta_- < (\lambda t_0)^2/2$
τ	$\frac{1}{\lambda}$	—	—

этой цепи полным будет являться такой отказ, который приведет либо к ее обрыву (отказ типа «обрыв»), либо к ее замыканию (отказ типа «Короткое замыкание»). Параметрическим (условным) будет являться отказ элемента, возникающий вследствие ухода его параметров за некоторые нормы, которые либо оговариваются в технической документации как критерии условного отказа, точности или стабильности элемента, либо определяют сохранение работоспособности схемы или функционального узла. Твердо установленных критериев параметрических отказов конденсаторов не существует. Действительно, если для прецизионной аппаратуры уход емкости контурного конденсатора на $\pm 1\%$ от первоначального значения может привести к ее отказу, то такое изменение емкости конденсатора фильтра практически останется незаметным. По причинам возникновения отказы можно подразделить на конструктивные, техноло-

гические и эксплуатационные. Весьма важно с точки зрения обоснования вопросов прогнозирования надежности правильно различать полный отказ от внезапного скачкообразного изменения параметров элементов. Внезапные (неожиданные) полные отказы могут иметь место только в следующих случаях:

при неблагоприятных сочетаниях в случайные моменты времени воздействующих факторов (вибрация, удары, повышенная температура, радиация, влага, резкое изменение электрической нагрузки и т. д.), приводящих к развитию лавинообразных процессов;

при случайных внешних воздействиях и возмущениях, превосходящих пределы прочности элемента (ошибочное включение аппаратуры под более высокое напряжение, действие боевых поражающих факторов и т. д.). Остальные полные отказы являются следствием медленных изменений в конденсаторе, не поддающихся чаще всего непосредственному измерению существующими методами. Медленные процессы накопления повреждений могут перейти в лавинообразные процессы разрушения, протекающие за время от долей секунды (пробой диэлектрика конденсатора, перекрытие межэлектродного зазора) до нескольких десятков секунд и минут, например, при нарушении теплового равновесия, заканчиваясь полным отказом. В каждом конкретном элементе процессы старения протекают с различной скоростью и поэтому для совокупности однородных элементов наблюдается то или иное распределение наработок до отказа. Понимание природы полных отказов позволяет на основании изучения закономерностей старения производить поиски путей их прогнозирования.

5-2. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НАДЕЖНОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ

Увеличение из года в год сложности электронного оборудования и ответственности выполняемых им функций вызывает необходимость повышения надежности комплектующих элементов. Конденсаторы являются обязательными элементами почти всех видов электронной аппаратуры, причем их количество превосходит в несколько раз число электровакуумных и полупроводниковых приборов. На единицу электронной аппаратуры в настоящее время приходится примерно от 30 до 600 000 конденсаторов различных типов.

Если в системе без резервирования имеется n элементов, каждый из которых имеет одинаковую интенсивность отказов λ и может привести к отказу всей системы, то вероятность безотказной работы этой системы при экспоненциальном распределении наработки элементов до отказа будет равняться

$$P(t) = e^{-n\lambda t}. \quad (5-9)$$

В табл. 5-4 приведены требуемые значения интенсивности отказов элементов для обеспечения различных значений $P(t)$, рассчитанных по формуле (5-9).

Таблица 5-4

Значения интенсивности отказов элементов, обеспечивающих заданную вероятность безотказной работы

$t, \text{ ч}$	$P(t)$		
	0,9	0,99	0,999
		$n = 50$	
100	$2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}$
1000	$2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}$	$2 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$
		$n = 540$	
100	$1,86 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}$	$1,86 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}$	$1,86 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$
1000	$1,86 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}$	$1,86 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$	$1,86 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$
		$n = 11\,200$	
100	$0,89 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}$	$0,89 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$	$0,89 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$
1000	$0,89 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$	$0,89 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$	$0,89 \cdot 10^{-10} \text{ 1/ч}$
		$n = 96\,000$	
100	$1,05 \cdot 10^{-8} \text{ 1/ч}$	$1,04 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$	$1,04 \cdot 10^{-10} \text{ 1/ч}$
1000	$1,04 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$	$1,04 \cdot 10^{-10} \text{ 1/ч}$	$1,04 \cdot 10^{-11} \text{ 1/ч}$
		$n = 232\,000$	
100	$4,3 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч}$	$4,3 \cdot 10^{10} \text{ 1/ч}$	$4,3 \cdot 10^{-11} \text{ 1/ч}$
1000	$4,3 \cdot 10^{-10} \text{ 1/ч}$	$4,3 \cdot 10^{11} \text{ 1/ч}$	$4,3 \cdot 10^{-12} \text{ 1/ч}$

Используя выражение (5-9) или приведенные в табл. 5-4 данные, с учетом требований к надежности и количеству конденсаторов, можно определить необходимые значения интенсивности отказов.

Таким образом, для обеспечения приемлемых уровней надежности современной аппаратуры только за счет минимального количества отказов конденсаторов значение интенсивности отказов последних должно быть весьма малым.

Приведенные значения интенсивности отказов относятся к эксплуатационным условиям, в которых на конденсатор воздействует целый комплекс различных факторов: электрическая нагрузка, температура, влажность, вибрация, удары и т. д.

В технические задания на разработку и модернизацию конденсаторов, а также в документы на их поставку обычно включают требования к вероятности безотказной работы (или интенсивности отказов) при номинальном напряжении постоянного тока и максимальной положительной температуре. Учитывая, что конденсаторы

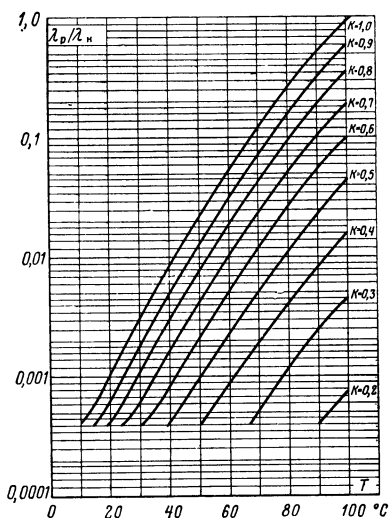


Рис. 5-2. Характер изменения отношения интенсивностей отказов от температуры при различных значениях коэффициента нагрузки K (λ_p) и в номинальном режиме (λ_n) для конденсаторов КЛС.

их эксплуатации к гарантируемому техническими условиями значениям составляет 0,01 для стационарной и полустационарной, 0,04 для корабельной и 0,4 для самолетной аппаратуры [37]. Расчеты, проведенные с учетом поправочных коэффициентов, являются весьма приближенными. Физическая природа отказа конденсаторов при

в аппаратуре работают, как правило, при существенно меньших электрических и тепловых нагрузках, чем это допускается, их эксплуатационная надежность оказывается значительно выше гарантируемой документацией на поставку конденсаторов. Последняя используется, в основном, для контроля уровня производства.

Для оценки надежности конденсаторов в режимах, близких к эксплуатационным, при расчете надежности аппаратуры часто используются поправочные коэффициенты к коэффициентам, полученным при лабораторных испытаниях. Ориентировочно считают, что отношение интенсивности отказов конденсаторов при

испытаниях в условиях воздействия повышенной температуры и электрического напряжения и при эксплуатации в условиях воздействия дополнительных климатических, механических и других факторов должна существенно различаться.

Более полную информацию для расчета надежности аппаратуры дают функциональные зависимости параметров надежности элементов от режима нагрузки. Использование этих зависимостей снижает ошибку при переходе от параметров надежности, полученных при испытании, к их ожидаемым значениям при эксплуатации. На рис. 5-2—5-3 приведены такие зависимости для некоторых типов керамических конденсаторов.

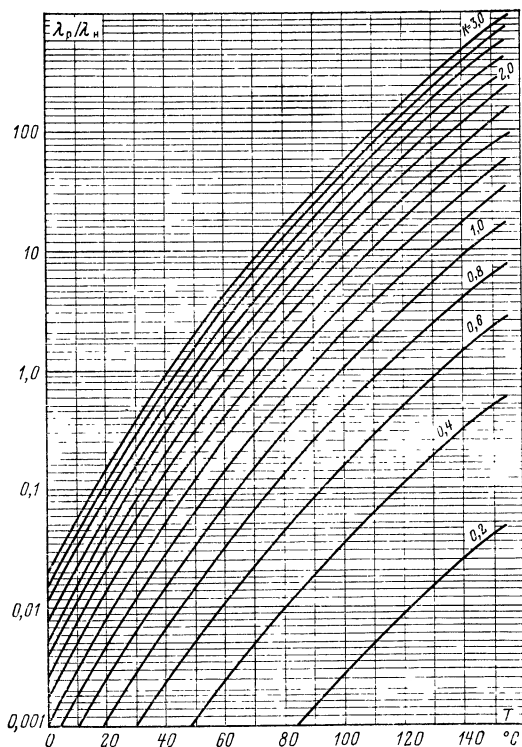


Рис. 5-3. Характер изменения отношения интенсивностей отказов от температуры при различных значениях коэффициента нагрузки K (λ_p) и в номинальном режиме (λ_n) для конденсаторов КТ-1Е.

Таким образом, требования к надежности элементов электронной техники в настоящее время являются одними из основных технических требований. Хотя существующие методы расчета требуемых параметров надежности являются приближенными, существуют определенные уровни надежности, которым должны соответствовать элементы электронной техники, предназначенные для комплектования различных видов аппаратуры в зависимости от ее сложности и жесткости эксплуатационных режимов. При выборе уровня надежности, которому должны соответствовать конденсаторы, предназначенные для конкретного типа аппаратуры, нельзя забывать и об экономической стороне вопроса. Конденсаторы особо высокой надежности, как правило, имеют более высокую цену и являются дефицитными. Необоснованный выбор для комплектования аппаратуры конденсаторов с надежностью более высокой, чем это требуется исходя из сложности и задач, выполняемых аппаратурой, может привести к ненужному увеличению ее стоимости.

5-3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Испытания на надежность могут проводиться либо для определения показателей надежности элементов при определенной наработке или их зависимостей от времени и жесткости воздействующих факторов (определятельные испытания), либо для контроля соответствия уровня надежности заданным требованиям (контрольные испытания). На основании сведений о поведении в процессе испытаний выборки из совокупности элементов, изготовленных за контролируемый период, необходимо получить оценки для всей совокупности с минимальной вероятностью ошибки. Подобные задачи решаются методами математической статистики, применяющимися, например, для контроля качества продукции. Однако, если при контроле качества устанавливается соответствие изделий техническим требованиям при их изготовлении, то испытания на надежность показывают, как изменяются параметры изделий с течением времени и, таким образом, параметр времени является характерным отличием испытаний на надежность. Несмотря на различия отдельных элементов по назначению, конструкции, технологии, уровням надежности и распределениям отказов во времени, оказалось возможным построение общих статистических процедур испытаний, учитывающих осо-

бенности элементов при выборе конкретных планов контроля.

В качестве основной характеристики надежности конденсаторов обычно выбирают вероятность безотказной работы $P(t)$. Так как испытания на надежность проводятся на выборке, для оценки надежности контролируемой совокупности используются доверительные границы, в пределах которых с заданной достоверностью P^* (доверительной вероятностью) находится оцениваемый параметр $P(t)$. Различные доли дефектных элементов в выборке и контролируемой партии обуславливают некоторые значения риска изготовителя α (т. е. вероятность того, что будет забракована партия элементов с уровнем надежности, равным приемлемому значению вероятности безотказной работы P_1) и риска заказчика β (вероятность того, что будет принята партия элементов с уровнем надежности, равным минимальному значению вероятности безотказной работы P_2). Если в партии из N элементов имеется M дефектных, то вероятность того, что в выборке n из этой партии будет m дефектных элементов, определяется гипергеометрическим распределением [38]

$$P(d=m) = \frac{C_m^M C_{N-M}^{n-m}}{C_n^N}, \quad (5-10)$$

где C — число сочетаний.

При условии, что размер выборки составляет не более 10% от размера партии, гипергеометрическое распределение с достаточной для практики точностью может быть заменена биномиальным распределением

$$P(d=m) = C_n^m P^m (1-P)^{n-m}, \quad (5-11)$$

где $P = \frac{M}{N}$ — вероятность безотказной работы элементов в партии.

При условии, что $P \geq 0,9$, биномиальное распределение хорошо сходится с распределением Пуассона

$$P(d=m) = \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \quad (5-12)$$

где $a = nQ$, а $Q = 1-P$ — доля дефектных изделий в партии.

Вероятность того, что в выборке размером n число дефектных элементов не будет превышать допустимой величины c , называемой приемочным числом, определяется равенством

$$P(d \leq c) = \sum_{d=0}^c \frac{(nQ)^d}{d!} e^{-nQ} \quad (5-13)$$

при условии, что $\frac{n}{N} \leq 0,1$, $P \geq 0,9$.

Если изготовитель предъявляет на испытания элементы со средним (приемлемым) уровнем надежности $P_1 = 1 - Q_1$, а допустимый минимальный уровень надежности, который проверяется при испытании выборки $P_2 = 1 - Q_2$, то риски изготовителя и заказчика определяются выражениями

$$\alpha = 1 - \sum_{d=0}^c \frac{(nQ_1)^d}{d!} e^{-nQ_1}, \quad (5-14)$$

$$\beta = \sum_{d=0}^c \frac{(nQ_2)^d}{d!} e^{-nQ_2}. \quad (5-15)$$

Ограничение $P \geq 0,9$ в формуле (5-13) снимается путем использования уравнения Л. Н. Большева:

для случаев $c \leq \frac{n-1}{2}$

$$P(\alpha \leq c) = \sum_{d=0}^c \frac{a^d}{d!} e^{-a}, \quad (5-16)$$

где $a = \frac{2n-c}{2-Q}$;

для случаев $c \geq \frac{n-1}{2}$

$$P(\alpha \leq c) = 1 - \sum_{d=0}^{n-c+1} \frac{\mu^d}{d!} e^{-\mu}, \quad (5-17)$$

где $\mu = \frac{(n+c-1)(1-Q)}{1+Q}$.

Формула (5-16) охватывает подавляющее большинство практических случаев и используется при составлении таблиц для планирования испытаний на надежность. В табл. 5-5 приведены размеры выборки для контроля допустимого минимального уровня вероятности безотказной работы P_2 при различных значениях риска заказчика β и приемочного числа c . Таблицей можно пользоваться при условии, что размер выборки не превышает

Таблица 5-5

Размеры выборки n , необходимых для контроля P_2 при различных значениях β и c [38]

c	n при $\beta = 0,1$ и P , равных			n при $\beta = 0,2$ и P , равных			n при $\beta = 0,3$ и P , равных		
	0,999	0,995	0,99	0,999	0,995	0,99	0,999	0,995	0,99
0	2301	459	229	1608	321	160	1203	240	120
1	3888	776	388	2993	598	299	2438	487	243
2	5320	1062	532	4278	855	427	3615	722	360
3	6679	1334	668	5513	1102	550	4671	951	475

10% от контролируемой партии. В этой таблице размеры выборки приведены для оценки $P_2 \leq 0,999$. Следует отметить, что это ограничение, не являясь принципиальным, обосновывается только на разумных, с практической точки зрения, объемах испытания. Объемы выборки могут быть определены изложенными выше методами и для более высоких уровней надежности. При добавлении к P_2 следующей «девятки» размер выборки увеличивается примерно в 10 раз ($P_2 = 0,999$, $c = 0$, $\beta = 0,1$, $n = 2301$; $P_2 = 0,9999$, $c = 0$, $\beta = 0,1$, $n \approx 23\,010$ и т. д.).

Контроль надежности может производиться по одному (с учетом P_2 , β) или двум (P_1 , P_2 , α , β) уровням надежности. Планирование испытаний может производиться, исходя из неизвестного, экспоненциального, нормального, логарифмически нормального или другого закона распределения наработки до отказа. Для конденсаторов обычно пользуются экспоненциальным распределением.

Если закон распределения наработки до отказа неизвестен, испытания на надежность планируются при продолжительности t_n , равной времени t_r , на которое определяются или контролируются параметры надеж-

ности элементов. При известном законе распределения испытания могут планироваться как при $t_{и}=t_r$, так и при $t_{и} \neq t_r$. Знание закона распределения позволяет варьировать размер выборки и продолжительность испытания и выбирать варианты, наиболее подходящие для конкретных условий.

Так, например, для подтверждения значения интенсивности отказов стеклянных конденсаторов постоянной емкости $\lambda=10^{-6}$ 1/ч американский стандарт MIL-C-23629A устанавливает при доверительной вероятности 0,9 объем испытания $2,3 \cdot 10^6$ элементочасов при $c=0$; $3,89 \cdot 10^6$ элементочасов при $c=1$; $9,3 \cdot 10^6$ элементочасов при $c=5$ и т. д. Американские технические условия обычно предусматривают проведение испытаний при доверительных вероятностях 0,6 или 0,9, причем в качестве основного выбрано $P^*=0,6$. В литературе по надежности имеются подробные таблицы для анализа и контроля надежности.

Изложенные статистические методы испытания на надежность в номинальном режиме при значениях $P_2 \geq 0,999$ требуют непомерно больших объемов испытаний и часто не позволяют контролировать предъявляемые в настоящее время разработчиками аппаратуры требования к надежности конденсаторов. Кроме того, полученная в результате испытаний при $t_{и}=t_r$ информация о надежности изделий существенно запаздывает по отношению к поставкам продукции потребителям. Таким образом, имеется явное противоречие между все время повышающимися требованиями к надежности элементов и возможностью ее определения и контроля. Эти обстоятельства привели к поискам методов, позволяющих получать информацию о надежности элементов на меньших выборках и в более сжатые сроки, чем позволяют описанные выше испытания. Такие испытания обычно называют ускоренными испытаниями на надежность.

Описанию принципов построения ускорения методов определения надежности радиоэлементов, конкретным методикам ускоренных испытаний на надежность и полученным в результате таких работ данным посвящено сравнительно большое количество работ. Наиболее подробный математический анализ ускоренных методов испытаний содержится в работе [39]. Однако сведения о возможности проведения ускоренных испытаний конкретных радиоэлементов в ней отсутствуют.

При рассмотрении методов ускоренных испытаний можно выделить следующие основные направления:

1. Отыскание базовых закономерностей, связывающих показатели надежности в номинальном и форсированном режимах испытаний, и экстраполирование результатов форсированных испытаний к номинальному режиму нагрузки. Форсированные испытания проводятся при постоянной либо переменной нагрузке.

2. Изучение степени дефектности изделий косвенными методами и определение уровня надежности без проведения длительных испытаний.

3. Отыскание связей между распределениями параметров изделий при различных наработках, представление изменений технических параметров во времени некоторыми функциями и прогнозирование параметров надежности по результатам испытания при малых наработках на более длительное время. Это направление для конденсаторов практически не получило развития.

Работы первого направления предполагают, что процессы, приводящие к выходу элемента из строя, ускоряются при увеличении нагрузки (для конденсаторов, в основном, увеличением напряжения и температуры), не изменяя по существу физическую природу отказа, а только сокращая наработку до него. Установив зависимости между параметрами надежности и режимом нагрузки, проводят испытания в форсированном режиме и, используя определенные на стадии предварительных исследований входящие в зависимость коэффициенты, рассчитывают параметры надежности для номинального режима.

Для описания зависимости параметров надежности от напряжения для конденсаторов чаще всего используется «степенной закон», установленный экспериментально для бумажных конденсаторов [40]:

$$\tau_2 = \tau_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^m, \quad (5-18)$$

где τ_i — средний срок службы при напряжении U_i ; m — постоянный коэффициент.

Коэффициент m определяется типом диэлектрика конденсатора и обычно принимается равным 3—5 для керамических, 4—6 для бумажных, 6—7 для металлобумажных конденсаторов.

Разброс значений коэффициента m для конденсаторов одного и того же типа объясняется особенностями

конструкции, технологии, чистотой исходного сырья и т. д. и по последним данным может лежать в более широких пределах, чем указано выше. Нередко приводимые различными авторами значения коэффициентов m существенно отличаются друг от друга. Зависимость (5-18) в ряде работ [40, 41, 42] используется в качестве базовой закономерности при ускоренных испытаниях на надежность. Для описания зависимости срока службы конденсаторов от температуры T наиболее распространенными являются выражения [1]

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot 2^{\frac{T_1 - T_2}{\kappa}}; \quad (5-19)$$

$$\tau_2 = \tau_1 e^{C \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}. \quad (5-20)$$

Коэффициенты κ и C зависят от типа диэлектрика, вида конденсаторов. Значения κ и C , приводимые разными авторами, часто не совпадают. Для расчета сроков службы по формуле (5-19) для конденсаторов, эксплуатируемых при температуре выше максимально допустимой, рекомендуется $\kappa = 10^\circ\text{C}$, при температуре ниже максимально допустимой — $\kappa = 15^\circ\text{C}$.

При одновременном использовании в качестве ускоряющих факторов температуры и напряжения срок службы выражается в виде

$$\tau_2 = \tau_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^m \cdot 2^{\frac{T_1 - T_2}{\kappa}}, \quad (5-21)$$

или

$$\tau_2 = \tau_1 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^m e^{C \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}. \quad (5-22)$$

Для электролитических конденсаторов иногда применяется несколько иная зависимость

$$\tau = \kappa_1 E^a \kappa_2 e^{-P(T_w - 25)}, \quad (5-23)$$

где E — напряженность электрического поля; a — постоянный множитель, определяющийся соотношением рабочего напряжения к формовочному; κ_1 , κ_2 — коэффициенты, определяющиеся конструкцией конденсатора, применяемыми материалами, толщиной оксидного слоя; P — постоянная, определяющаяся конструкцией конденсатора; T_w — рабочая температура.

Иногда по данным испытаний конденсаторов при различных нагрузках зависимости показателей надежности от жесткости режима выражаются в виде интерполяционного многочлена и используются в дальнейшем для расчета параметров надежности в режимах, отличных от испытательного. Так, например, для стекломалевых конденсаторов с помощью вычислительной машины было найдено выражение при коэффициенте корреляции $r=0,966$ [43]

$$\lg(2 \cdot 10^{-2}, 1/\varphi) = 2,546P + 0,134T - 0,497 \lg\left(\frac{t}{1000}\right) + 0,402, \quad (5-24)$$

где T — температура, °C; t — время, ч; P — отношение испытательного напряжения к номинальному.

Для обоснования зависимостей (5-18), (5-20) часто используют уравнения Аррениуса и Айринга [41]. Эмпирический закон Аррениуса устанавливает зависимость скорости химических реакций R от абсолютной температуры T

$$R = ae^{-\frac{b}{kT}}. \quad (5-25)$$

В соотношение Айринга входит член, содержащий нагрузку:

$$R = R_0 e^{nS} = a_1 T^\omega e^{-\frac{b}{kT} + S\left(c + \frac{d}{kT}\right)}, \quad (5-26)$$

где R_0 — скорость реакции в отсутствии приложенных напряжений; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура элемента; a_1, a, b, c, d, ω — постоянные коэффициенты, не зависящие от времени, температуры и нагрузки; $n = c + d/kT$; S — функция приложенной нагрузки.

Скорость старения элементов, в том числе и конденсаторов, принимается пропорциональной скорости химической реакции R , которая определяет преобладающий механизм выхода элемента из строя.

При испытании конденсаторов электрическим напряжением U функция нагрузки S (при постоянной температуре) выражается в виде

$$S = \ln U. \quad (5-27)$$

Используя соотношение (5-26), получают:

$$R = R_0 e^{\ln U^n} = R_0 U^n = K \frac{dD}{dt}, \quad (5-28)$$

где k — коэффициент пропорциональности; D — общее количество вышедших из строя деталей.

Интегрируя (5-28), можно получить выражение для определения общего количества отказавших элементов, которое и считают теоретическим обоснованием степенного закона:

$$D = \frac{R_0}{K} U^n t + d_0, \quad (5-29)$$

где d_0 — начальное количество отказавших деталей.

Отсутствие обоснования выбора функции нагрузки (5-27) придает такому объяснению степенного закона несколько формальный характер.

Наряду с ускоренными методами испытания при постоянном уровне электрической нагрузки известны методы испытания линейно возрастающим или ступенчатым напряжением. В основу этого метода положена гипотеза «накопленного разрушения», в соответствии с которой отказ конденсатора происходит в результате процесса накопления в диэлектрике энергии, достаточной для его разрушения. При фиксированной температуре общее накопленное повреждение Q за время t_1 определяется уравнением

$$Q = K \int_0^{t_1} [U(t)]^m dt, \quad (5-30)$$

где K, m — постоянные коэффициенты.

При постоянном напряжении это уравнение может быть легко преобразовано в степенной закон (5-18). В случае линейного возрастания напряжения от нуля со скоростью C накопленное повреждение к моменту времени τ_b будет равняться

$$Q = K \int_0^{\tau_b} (Ct)^m dt = K \frac{Cm\tau_b^{m+1}}{m+1}. \quad (5-31)$$

При условии, что отказ конденсатора как в режиме постоянного, так и в режиме линейно возрастающего напряжения происходит при одном и том же «количестве накопленного повреждения», получено уравнение, связы-

вающее значение наработки до отказа конденсатора в режиме постоянного τ_n и линейно возрастающего напряжения:

$$\tau_n = \frac{C m \tau_B^{m+1}}{U^m (m+1)}. \quad (5-32)$$

Это уравнение используется и для определения средней наработки до отказа. При проведении ускоренных испытаний на надежность определяют среднее значение наработки до отказа конденсаторов при линейно возрастающей нагрузке, а затем делают пересчет в соответствии с выражением (5-32) к номинальному режиму при постоянной нагрузке. Если напряжение на конденсаторе возрастает не линейно, а равными ступенями U_n через постоянные промежутки времени t_s , то применяется следующая формула:

$$\tau_n \approx K \left(\frac{U_n}{U} \right)^m t_s \frac{n}{m+1}, \quad (5-33)$$

где n — количество ступеней, при которых произошел отказ.

Для керамических конденсаторов КТ-1-Н70 при использовании для ускоренных испытаний метода линейно возрастающего напряжения рекомендуется выбирать значение коэффициента m в пределах от 3,6 до 4,4.

К работам второго направления [44, 45] можно отнести попытки прогнозирования надежности конденсаторов по значению тангенса угла потерь, ионизационным характеристикам и т. д. Работы по изучению ионизационных характеристик, распределения электрической прочности и некоторых других параметров конденсаторов, хотя и относятся некоторыми авторами к категории ускоренных испытаний, однако, как правило, носят качественный характер и не позволяют даже приблизительно рассчитывать параметры надежности.

Представляет практический интерес имеющаяся в США практика оценки надежности элементов по состоянию производства, системы контроля качества, наличию необходимого оборудования, квалификации персонала и т. д. В зависимости от указанных факторов предприятие-изготовитель получает документ на изготовление изделий с определенным значением интенсивности отказов, которое первоначально должно быть подтверждено при доверительной вероятности 0,6 или 0,9. В дальнейшем производится проверка соответствия элементов всем

пунктам ТУ, включая и испытания на надежность (срок службы), при сокращенных выборках. Оценка надежности может производиться по совокупности нескольких испытаний. Если изготовитель не обеспечивает поставку конденсаторов с гарантируемым уровнем надежности, он лишается документа на поставку элементов, соответствующих данному уровню. Естественно, что такая система не обеспечивает статистически достоверного контроля соответствующего уровня надежности (который при $\lambda \leq 10^{-8}$ 1/ч носит, в основном, рекламный характер) и, вероятно, является компромиссным соглашением между изготовителем и заказчиком. Следует отметить, что система предполагает проведение повторных испытаний только при наличии ускоренных методов.

При попытках создания методов ускоренных испытаний на надежность многие авторы приходят к выводу о необходимости теоретических исследований и экспериментов в области физики отказа деталей. В ряде случаев такие исследования могут позволить установить зависимости параметров надежности от жесткости воздействующих факторов значительно точнее и проще, чем чисто статистические методы. Поэтому работам в указанном направлении уделяется большое внимание. Наиболее перспективными, на наш взгляд, являются работы, сочетающие физические методы исследования старения элементов со статистическими методами описания процессов старения и использованием полученных результатов для прогнозирования параметров надежности.

Интересной в этом направлении является методика ускоренных испытаний на надежность некоторых типов керамических конденсаторов. Поскольку общие положения, положенные в основу этой методики, могут оказаться полезными и при разработке ускоренных методов оценки надежности других конденсаторов, авторы сочли целесообразным изложить их более подробно в следующем параграфе.

5.4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ НЕКОТОРЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

В основу методики положена найденная нами базовая закономерность, связывающая параметры надежности (по полным отказам) в номинальном и форсированном

режимах и позволяющая производить экстраполирование результатов испытаний в форсированном режиме к режиму номинальной нагрузки. Разработка методики производилась в следующей последовательности.

1. Оценка параметров, характеризующих старение конденсаторов.

2. Определение соотношений, связывающих показатели надежности в номинальном и форсированном режимах.

3. Определение функции распределения наработок конденсаторов до отказа.

4. Выбор допустимых режимов форсированных нагрузок.

5. Построение процедуры ускоренных испытаний и статистической оценки достоверности пересчета результатов испытаний в форсированном режиме к режиму номинальной нагрузки.

В качестве объекта для исследования старения керамических конденсаторов были выбраны выпускаемые в больших количествах трубчатые низковольтные керамические конденсаторы КТ-1 из рутиловой керамики Т-80, которые оказались весьма удачной моделью для описания процессов старения многих керамических материалов. Конденсаторы испытывались при различных значениях повышенной температуры и напряжений постоянного тока. В качестве основной характеристики старения было выбрано изменение тока про-

водимости по времени при воздействии электрической и тепловой нагрузок. Для определения этой характеристики в процессе испытаний производилось периодическое измерение токов проводимости без изъятия конденсаторов из испытательной камеры под напряжением, при котором проводилось старение. Для оценки возможного разброса параметров, характеризующих старение, испытывались выборки конденсаторов, отобранные из различных производственных партий на протяжении 2 лет.

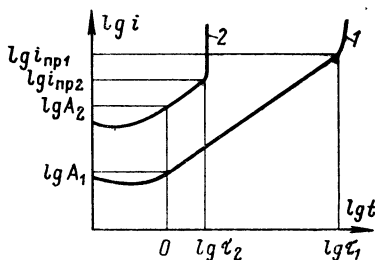


Рис. 5-4. Характер зависимости $\lg i = f(\lg t)$ при испытании в двух различных режимах.

По результатам испытаний строились зависимости тока проводимости от времени испытания для каждого исследованного режима. Эти зависимости практически не отличались от описанных в параграфе 1-7. На рис. 5-4 показан наиболее характерный вид зависимостей $\lg i = f(\lg t)$ при испытании в двух различных режимах. Второй этап этой зависимости хорошо описывается эмпирическим соотношением (1-23). По окончании испытаний для каждого образца определялись значения коэффициентов A и B , входящих в соотношение (1-23).

В процессе исследования было установлено, что значение тока $i_{пр}$, при котором наступает пробой, зависит от приложенного напряжения U , причем в обследованном диапазоне температур и напряжений значения мощности тепловыделения в конденсаторе

$$W_{пр} = i_{пр}U \approx \text{const}, \quad (5-34)$$

приводящие к пробую, оказались равными. Таким образом, было установлено, что пробой конденсаторов КТ-1 из материала Т-80 происходит в результате увеличения тока проводимости в момент достижения некоторого постоянного (для данного видоразмера конденсатора) критического значения мощности тепловыделения.

С использованием способа наименьших квадратов были установлены зависимости коэффициента A от напряжения и температуры

$$\lg A = \lg A' + \kappa_1 \lg U, \quad T = \text{const}; \quad (5-35)$$

$$\lg A = \lg A'' - \kappa_2 \frac{1}{T}, \quad U = \text{const}, \quad (5-36)$$

где T — абсолютная температура, К; κ_1 , κ_2 — постоянные коэффициенты, причем, коэффициент κ_1 оказался не зависящим от напряжения, а κ_2 — от температуры.

Входящий в выражение (1-23) коэффициент B не зависит от температуры и напряжения.

Однако для отдельных производственных партий наблюдался статистический разброс значений коэффициентов κ_1 , κ_2 и B в следующих пределах:

$\kappa_1 = 4 \div 5,25$ при среднем значении $\bar{\kappa}_1 = 4,6$;

$\kappa_2 = (6,6 \div 8,1) \cdot 10^3$ К при среднем значении $\bar{\kappa}_2 = 7,4 \cdot 10^3$ К;

$B = 0,9 \div 1,6$ при среднем значении $\bar{B} = 1,2$.

Выражения (1-23, 5-34—5-36) были использованы для нахождения соотношения, связывающего показатели надежности в номинальном и форсированном режимах.

Для случая пробоев конденсатора в двух различных режимах испытания (рис. 5-4, 1 — при напряжении U_1 и температуре T_1 ; 2 — при напряжении U_2 и температуре T_2) условие (5-34) можно представить в следующем виде:

$$U_1 i_{\text{пр}1} = U_2 i_{\text{пр}2}. \quad (5-37)$$

Выразив значения токов $i_{\text{пр}1}$ и $i_{\text{пр}2}$ через (1-23), (5-35), (5-36), получим:

$$\begin{aligned} T = \text{const}, \quad A_1 \tau_1^B U_1 &= A_2 \tau_2^B U_2; \\ A' \tau_1^B U_1^{\kappa_1+1} &= A' \tau_2^B U_2^{\kappa_1+1}; \\ \frac{\tau_1}{\tau_2} &= \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^{\frac{\kappa_1+1}{B}} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^m; \end{aligned} \quad (5-38)$$

$$\begin{aligned} U = \text{const}, \quad A'' \tau_1^B e^{-\frac{\kappa_2 \ln 10}{T_1}} U &= A'' \tau_2^B e^{-\frac{\kappa_2 \ln 10}{T_2}} U; \\ \frac{\tau_1}{\tau_2} &= e^{\frac{\kappa_2}{B} \ln 10 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = e^{C \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \end{aligned} \quad (5-39)$$

где τ_1 и τ_2 наработки до пробоя конденсатора в режимах 1 и 2;

$$m = \frac{\kappa_1 + 1}{B}, \quad C = \frac{\kappa_2 \ln 10}{B}. \quad (5-40)$$

Так как коэффициент m не зависит от температуры, а коэффициент C — от напряжения, соотношение, связывающее наработку до отказа в двух различных режимах (в том числе, в номинальном и форсированном), будет иметь вид:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^m e^{C \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} = K. \quad (5-41)$$

Выражение (5-41) для удобства использования в дальнейшем обозначим через K (коэффициент ускорения). Среднее время наработки до отказа определяется как среднее арифметическое значение наработок до отказа всех конденсаторов, и, следовательно, выражение (5-41) будет пригодно для его оценки.

Выражение (5-41) не отличается от известной ранее эмпирической формулы (5-22). Можно показать, что формула (5-19) является частным случаем соотношения (5-39)

$$e^{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} = 2^{\frac{C(T_2 - T_1)}{\ln 2 T_1 T_2}} = 2^{\frac{T_2 - T_1}{K^*}}, \quad (5-42)$$

где $K^* = \ln 2 T_1 T_2 / C$.

Учитывая, что в определенном диапазоне температур произведение $T_1 T_2$ будет меняться незначительно, K^* будет практически оставаться постоянно.

Интересно отметить, что несмотря на существенные различия в механизмах старения разных диэлектриков и причинах, вызывающих отказы конденсаторов, вид приводимых различными авторами зависимостей сроков службы конденсаторов разных типов оказывается одинаковым (степенной от напряжения и экспоненциальный от обратной температуры) [1, 41, 42].

Используя формулы (5-40), оценим ожидаемые значения коэффициентов m и C . Подставляя средние значения коэффициентов k_1 , k_2 и B , получим:

$$\bar{m} \approx 4,7; \quad C \approx 14 \cdot 10^3 \text{ К}.$$

Естественно, что для отдельных партий будет наблюдаться разброс значений m и C из-за разброса коэффициентов k_1 , k_2 и B около их средних значений. Для определенных в описанных выше экспериментах значений коэффициентов максимальный разброс значений m и C будет при следующих сочетаниях:

$k_1 = 4,$	$B = 1,6,$	$m \approx 3,1;$
$k_1 = 5,24,$	$B = 0,9,$	$m \approx 7;$
$k_2 = 6,6 \cdot 10^3,$	$B = 1,6,$	$C \approx 9,5 \cdot 10^3 \text{ К};$
$k_2 = 8,1,$	$B = 0,9,$	$C \approx 20,1 \cdot 10^3 \text{ К}.$

Таким образом, для разных образцов и партий конденсаторов из-за различия параметров, характеризующих их старение, могут наблюдаться различия коэффициентов, входящих в зависимость показателей надежности от режима нагрузки при сохранении общего вида самой зависимости. Хотя вывод формулы (5-41) основывался на результатах изучения старения керамики Т-80, она оказалась справедливой для многих применяемых в настоящее время керамических диэлектриков.

Если наработка конденсатора до отказа определяется только степенью его дефектности и режимом нагрузки, то естественно предположить, что соотношение между наработками до отказа в различных режимах должно сохраняться, т. е. если в номинальном режиме нагрузки для i образцов имеет место соотношение

$$\tau^{H_1} < \tau^{H_2} < \tau^{H_3} < \dots < \tau^{H_i},$$

то в форсированном режиме нагрузки будет справедливо соотношение

$$\tau^{\Phi_1} < \tau^{\Phi_2} < \tau^{\Phi_3} < \dots < \tau^{\Phi_i},$$

причем

$$\frac{\tau^{H_1}}{\tau^{\Phi_1}} = \frac{\tau^{H_2}}{\tau^{\Phi_2}} = \dots = \frac{\tau^{H_i}}{\tau^{\Phi_i}} = K, \quad (5-43)$$

где коэффициент ускорения K определяется в соответствии с выражением (5-41).

Условие (5-43) означает, что вид распределения наработок конденсаторов до отказа будет сохраняться при изменении напряжения и температуры. Таким образом предполагается, что отношение времен, к которому откажет $q \cdot 100\%$ изделий в номинальном и форсированном режимах не зависит от q :

$$\frac{t^{Hq}}{t^{\Phi q}} = K. \quad (5-44)$$

Отметим, что условие (5-43) является излишне строгим и в большинстве случаев достаточным является практически более выполнимое условие

$$\frac{\sum_{i=1}^n \tau^{H_i}}{n} = K. \quad (5-45)$$

$$\sum_{i=1}^n \tau^{\Phi_i}$$

Распределение наработок до отказа исследованных керамических конденсаторов оказалось довольно хорошо совпадающим с логарифмически нормальным законом. Сопоставление экспериментальной зависимости $Q(\lg t)$ конденсаторов КТ-3 с логарифмически нормальным законом приведено на рис. 5-5.

Как показано Г. М. Шмидтом, условие (5-44) для двухпараметрических распределений соблюдается только тогда, когда коэффициент вариации распределений, определяемый как отношение среднего квадратического отклонения к математическому ожиданию, остается постоянным. Коэффициент вариации логарифмически нормального распределения зависит только от среднего квадратического отклонения $\bar{\sigma}$

$$v = \sqrt{\frac{\bar{\sigma}_a}{M^2}} - 1, \quad (5-46)$$

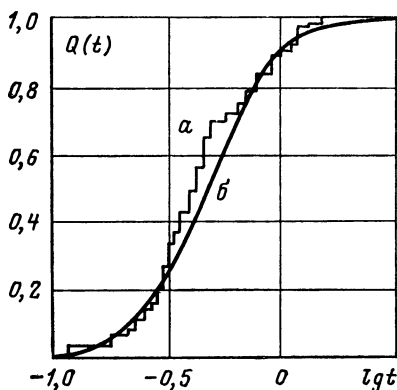


Рис. 5-5. Сопоставление экспериментально полученной зависимости $Q(t)$ (а) с теоретической (б) при логарифмически нормальном распределении наработок до отказа для конденсаторов КТ-3 в форсированном режиме.

где M — коэффициент перехода от натуральных к десятичным логарифмам.

Следовательно, при этом значение σ не будет зависеть от режима нагрузки, так как $v = \text{const}$. Значение вероятности безотказной работы при логарифмически нормальном распределении определяется выражением

$$P(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi(x), \quad (5-47)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^x e^{-\frac{1}{2} x^2} dx$ — функция Лапласа;

$$x = \frac{\lg t - \lg \tau_{\text{ср}}}{\sigma}.$$

Учитывая, что

$$\sigma^H = \sigma \Phi = \sigma \quad \text{и} \quad \frac{\tau_{\text{Hср}}}{\tau_{\Phi\text{ср}}} = K,$$

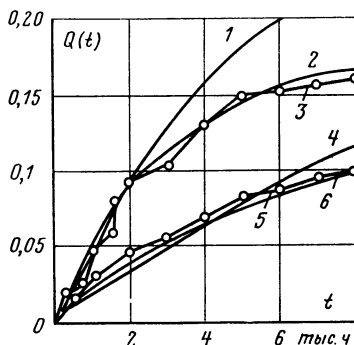
получим формулу для расчета вероятности безотказной работы в номинальном режиме по результатам испытания в форсированном режиме

$$P_H(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi(x_H), \quad (5-48)$$

где $x_H = \frac{\lg t - \lg K - \lg \tau_{\Phi \text{ ср}}}{\sigma}$.

Рис. 5-6. Сопоставление экспериментально полученных зависимостей $Q(t)$ (3, 5) с теоретическими при логарифмически нормальном (2, 6) и экспоненциальном (1, 4) распределениях наработок до отказа для конденсаторов КЛС.

Режим испытания: кривые 1, 2, 3 — 155°C, 1,5U_{ном}. Режим испытания: кривые 4, 5, 6 — 125°C, 1,5U_{ном}.



При высоких значениях вероятности безотказной работы [$P(t) \geq 0,9$] распределения наработок до отказа исследованных керамических конденсаторов оказались совпадающими с одинаковой степенью достоверности как с логарифмически нормальным, так и с экспоненциальным распределениями. На рис. 5-6 показано сравнение экспериментальных данных с экспоненциальным и логарифмически нормальным теоретическими распределениями.

При экспоненциальном распределении вероятности безотказной работы в номинальном и форсированном режиме будут соответственно равны:

$$P_H(t) = e^{-\lambda_H t}, \quad P_F(t) = e^{-\lambda_F t}. \quad (5-49)$$

Для квантилей одного и того же уровня q имеем:

$$e^{-\lambda_H t_H^q} = e^{-\lambda_F t_F^q}$$

и, следовательно,

$$\frac{\lambda_F}{\lambda_H} = \frac{t_H^q}{t_F^q} = K. \quad (5-50)$$

Условие (5-50) можно получить непосредственно и из (5-46). Таким образом, показатели надежности в номинальном режиме при экспоненциальном распределении могут быть выражены через любой показатель, определенный в форсированном режиме:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_\Phi}{K} - \frac{1}{K\tau_\Phi} = -\frac{1}{Kt_{\Phi n}} \ln P_\Phi(t_{\Phi n}), \quad (5-51)$$

где $t_{\Phi n}$ — время испытания в форсированном режиме;

$$\tau_n = K\tau_\Phi = \frac{K}{\lambda_\Phi} = -\frac{Kt_{\Phi n}}{\ln P_\Phi(t_{\Phi n})}; \quad (5-52)$$

$$P_n(t) = e^{-\frac{\lambda_\Phi t}{K}} = e^{-\frac{t}{K\tau_\Phi}} = [P_\Phi(t_{\Phi n})]^{-\frac{t}{Kt_{\Phi n}}}. \quad (5-53)$$

Если для логарифмически нормального закона при переходе от форсированного режима нагрузки к номинальному требовалось знание кроме коэффициента ускорения K двух показателей надежности ($\lg \tau_\Phi^{\text{ср}}$ и σ), то при экспоненциальном законе в силу его однопараметричности необходимо определить только один из показателей [$P_\Phi(t)$, λ_Φ или τ_Φ].

Для значений $P(t) \geq 0,9$ с учетом приближенной формулы для экспоненциального закона

$$P(t) = 1 - \lambda t$$

соотношение между вероятностями безотказной работы в номинальном и форсированном режимах упрощается

$$P_n(t) = 1 - \frac{t [1 - P_\Phi(t_n)]}{Kt_{\Phi n}}. \quad (5-54)$$

Так как в настоящее время для контроля надежности чаще всего используется вероятность безотказной работы $P(t)$, выражение (5-54) использовалось в качестве основной формулы в методике ускоренных испытаний на надежность.

Ускоренные испытания, так же как и испытания в номинальном режиме, по своему назначению могут быть определительными и контрольными. При определительных испытаниях, рассчитав с использованием сведений об отказах выборки в форсированных режимах нагрузки значение $P_\Phi(t_n)$ по формулам (5-41), (5-54), определяют значение $P_n(t)$ для номинального режима. Однако при этом необходимо точное значение коэффициентов m и C , определяющих значение коэффициента ускорения

K , которые, как указывалось выше, могут изменяться для разных партий конденсаторов. Поэтому для каждой испытываемой партии необходимо определять точные значения m и C , например, путем испытания при нескольких форсированных значениях температуры и напряжения.

Контрольные испытания на надежность являются основным видом испытаний при производстве конденсаторов. Эти испытания должны обеспечивать контроль нижней доверительной границы вероятности безотказной работы с заданной достоверностью (или с заданным риском заказчика). Этому требованию должны соответствовать и ускоренные контрольные испытания на надежность. Одной из наиболее существенных составляющих, обуславливающих достоверность ускоренных испытаний, является достоверность определения коэффициента ускорения. Предположим, что на стадии предварительных исследований определены опытное значение коэффициента ускорения $K_{оп}$, его нижняя $K_{мин}$ и верхняя $K_{макс}$ доверительные границы. Тогда зависимости вероятности безотказной работы в номинальном режиме от вероятности безотказной работы в форсированном режиме при использовании значений $K_{оп}$, $K_{мин}$ и $K_{макс}$ в формуле (5-54) будут иметь вид, изображенный на рис. 5-7.

С помощью указанных зависимостей можно определить подлежащие контролю в форсированном режиме значения $P^ф$, соответствующие контролируемому в номинальном режиме $P^н$. Так как всегда $K > 1$, то и $P^ф < P^н$ и, следовательно, объем испытания (размер выборки, время испытания или и то и другое) будет сокращен. Используя для контроля значения вероятности безотказной работы в номинальном режиме $P^н_0$ зависимостью 2 (рис. 5-7), построенную с использованием $K_{оп}$, получим некоторое значение $P^ф_2$, соответствующее данной партии при испытании которой было определено $K_{оп}$. Как указывалось, для разных партий значения K могут разли-

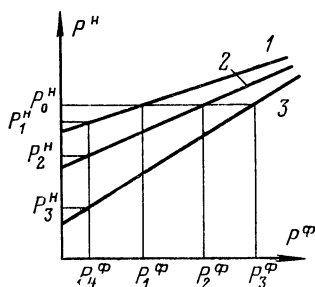


Рис. 5-7. К оценке достоверности ускоренных испытаний на надежность.

1 — $K_{макс}$; 2 — $K_{оп}$; 3 — $K_{мин}$.

чатся. Если для пересчета воспользоваться $K_{\max}$ (зависимость 1), то в форсированном режиме необходимо будет контролировать $P_{\Phi_1} < P_{\Phi_2}$. При этом увеличивается вероятность получения положительных результатов испытаний для партий, имеющих надежность $P_n < < P_{n_0}$ при истинном значении коэффициента ускорения $K < K_{\max}$, что соответствует максимальному риску изготовителя и минимальному риску заказчика. Используя для пересчета $K_{\min}$ (зависимость 3), получим необходимое для контроля в форсированном режиме значение $P_{\Phi_3} > P_{\Phi_2}$. Партии, имеющие зависимость, лежащую выше прямой 3 будут браковаться чаще, чем это было бы при контроле P_{n_0} в номинальном режиме, т. е. риск изготовителя увеличится. Однако при этом риск заказчика будет минимальным. Для планирования испытаний с заданным риском заказчика и изготовителя необходимо иметь семейство зависимостей, изображенных на рис. 5-7, рассчитанных с различной достоверностью. Общая достоверность ускоренных испытаний P^* будет определяться достоверностью определения доверительных границ K и достоверностью контроля P_{Φ} .

Практика проведения испытаний на надежность в номинальных режимах нагрузки показала, что планирование испытаний с учетом рисков изготовителя и заказчика одновременно затруднительно, так как необходимые данные о среднем уровне надежности получить часто не представляется возможным. Обычно испытания планируются только с учетом риска заказчика, т. е. оценивается вероятность того, что будет принята продукция с надежностью ниже гарантируемого уровня. Изготовителю для получения положительных результатов необходимо предъявлять продукцию с уровнем надежности, превосходящим гарантируемый.

Такой же подход был осуществлен и при планировании ускоренных испытаний. Пересчет гарантируемого значения вероятности безотказной работы P_n к контролируемому в форсированном режиме P_{Φ} осуществляется с использованием в выражении (5-54) нижней доверительной границы $K_{\min}$. Если достоверность определения $K_{\min}$ составляет P^*_1 , а достоверность контроля $P_{\Phi_{\min}}$ — P^*_2 , общая достоверность контроля $P_{n_{\min}}$ определится как

$$P^* = P^*_1 P^*_2, \quad (5-55)$$

а риск потребителя

$$\beta = 1 - P^*_{1c} P^*_{2c}. \quad (5-56)$$

Достоверность P^*_{1c} в свою очередь определяется достоверностью определения нижних доверительных границ коэффициентов $m(P^*_{1m})$ и $C(P^*_{1c})$

$$P^*_{1c} = P^*_{1m} P^*_{1c}. \quad (5-57)$$

Подобным образом может быть проведен и расчет показателей надежности в режиме номинальной нагрузки по данным испытания в форсированном режиме: получив в режиме форсированной нагрузки значение P_{Φ_4} , используя зависимость 2, определим среднее значение P_{Φ_2} , а с помощью зависимостей 1 и 3 — доверительные границы P_{Φ_1} и P_{Φ_3} .

Оценка нижних доверительных границ для m и C была проведена с использованием неравенства Чебышева, справедливого для любого распределения:

$$m_{\min} = \bar{m} - \sqrt{\frac{S^2_m}{n_m (1 - P^*_{1m})}}; \quad (5-58)$$

$$C_{\min} = \bar{C} - \sqrt{\frac{S^2_c}{n_c (1 - P^*_{1c})}}. \quad (5-59)$$

где $\bar{m}$ и $\bar{C}$ — средние арифметические значения m и C , определенные по n_m и n_c количеством различных испытаний; S^2_m и S^2_c — статистическая оценка для дисперсии m и C .

1. Ренне В. Т. Электрические конденсаторы. М., «Энергия», 1969. 591 с. с ил.
2. Сканави Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). ГИФМЛ, 1958. 907 с. с ил.
3. Койков С. Н. Физика диэлектриков. МВШСОО РСФСР, ЛПИ им. Калинина, 1967. 246 с. с ил.
4. Койков С. Н., Цикин А. Н. Электрическое старение твердых диэлектриков. Л., «Энергия», 1968. 186 с. с ил.
5. Кунин В. Я., Цикин А. Н. Изучение процессов, происходящих в рутиловой керамике и монокристаллов рутила при длительном воздействии электрического поля. — В кн.: Пробой диэлектриков и полупроводников, Л., «Энергия», 1965, с. 339.
6. Кунин В. Я., Цикин А. Н., Шакиров А. Изменение электропроводности керамик с решеткой перовскита в электрическом поле и повышенной температуре. — «Физика твердого тела», т. 7, № 12, 1965.
7. Пирятинский А. З. К вопросу об электрическом пробое технических диэлектриков. — «ЖТФ», т. 22, вып. 10, 1952, с. 1556.
8. Ренне В. Т., Багалеи Ю. В., Фридберг И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов постоянной емкости. Киев, «Техника», 1966. 322 с. с ил.
9. Торошин П. А. Металлобумажные конденсаторы. ГЭИ, 1965. 218 с. с ил.
10. Грибовский П. О., Терентьева Т. И. Миниатюрные керамические конденсаторы. М., «Энергия», 1966. 144 с. с ил.
11. Электрический конденсатор постоянной емкости. А. С. № 260021 (СССР). Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1970, № 3, с. 63. Авт.: В. Ш. Бруштейн, М. Ю. Воловик, В. Н. Гусев и др.
12. Керамический конденсатор постоянной емкости. А. С. № 242278 (СССР). Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1969, № 15, с. 53. Авт.: В. Ш. Бруштейн, М. Ю. Воловик, В. Н. Гусев, В. Ф. Смирнов.
13. Электрический конденсатор постоянной емкости. А. С. № 246678 (СССР). Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1969, № 21, с. 63. Авт.: В. Ш. Бруштейн, М. Ю. Воловик, В. Н. Гусев, В. Ф. Смирнов.
14. Высоковольтные керамические конденсаторы. М., «Советское радио», 1970. 206 с. с ил. Авт.: Н. П. Богородицкий, В. А. Гедзюн, Н. А. Мандрыка.
15. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы. М., «Энергия», 1972, 160 с. с ил. Авт.: В. Д. Пономаренко, Р. А. Роздова, Р. Г. Айнштейн, Г. А. Горячева.
16. Карпихин В. В. Технология изготовления слюдяных и стеклоэмалевых конденсаторов. М.—Л., «Энергия», 1963, ГЭИ. 253 с.

17. **Закгейм Л. Н.** Электролитические конденсаторы, ГЭИ, 1963, 284 с. с ил.

18. **Железнов М. Т.** Вакуумные конденсаторы. — «Электронная техника». Сер. 9, 1969, вып. 5, с. 54—62.

19. **Деревянко И. А.** Некоторые вопросы технологии вакуумных конденсаторов. — «Электронная техника». Сер. 9, 1969, вып. 5, с. 63—68.

20. **Круглов А. А.** Определение переходной проводимости изоляции радиотехнических деталей. — «Известия ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)», 1966, вып. 57, ч. 1, с. 57—66.

21. **Ануфриев Ю. А.** О поляризационных потерях в диэлектрике при импульсном режиме. — «Электронная техника. Сер. Радиодетали», 1966, № 1, с. 79—86.

22. **Ануфриев Ю. А.** Расчет потерь в конденсаторах, работающих в импульсном режиме. — «Электронная техника». Сер. «Радиодетали», 1968, № 4/13, с. 33—43.

23. **Ануфриев Ю. А.** Расчет и применение силовых конденсаторов. — «Электронная промышленность», вып. 5, 1974, с. 22—29.

24. **Ренне В. Т., Карабанов В. И., Бушля Ю. А.** К вопросу о расчете конденсаторов для линии формирования. — «Вопросы радиоэлектроники». Сер. III, 1965, 4, с. 22—35.

25. **Ануфриев Ю. А.** Влияние кратковременных токов на работоспособность металлизированных конденсаторов при импульсных нагрузках. — «Электронная техника». Сер. «Радиодетали», 1969, № 3 (16), с. 21—28.

26. **Ануфриев Ю. А., Картышев Б. И., Гусев В. Н.** Некоторые общие случаи расчета потерь в конденсаторах, работающих в импульсном режиме. — «Электронная техника». Сер. «Радиодетали», 1969, № 4 (17), с. 3—13.

27. **Машины, приборы и другие технические изделия.** Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды, ГОСТ 15150-69. Введ. 1/1 71, 37 с.

28. **Изделия электронной техники и электроники.** Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний. ГОСТ 16962-71. Введ. 1.7.71, 98 с.

29. **Изделия электронной техники, предназначенные для эксплуатации в тропических условиях.** Технические требования и методы испытаний в части воздействия климатических факторов. ГОСТ 17799-72. Введ. 1.1.73, 4 с.

30. **Вольф Е. М., Якжина Н. В., Гальперин П. М.** Влияние особо низких температур на емкость и тангенс угла потерь конденсаторов. — «Электронная техника». Сер. «Радиодетали», вып. 3 (16), 1969, с. 11—21.

31. **Дозиметрия ионизирующих излучений.** Терминология. Сборник рекомендуемых терминов, вып. 76. М., «Наука», 1968, 21 с.

32. **Ширшев Л. Г.** Ионизирующие излучения и электроника. М., «Советское радио», 1969. 192 с. с ил.

33. **Влияние облучения на материалы и элементы электронных схем.** Пер. с англ. под ред. В. Н. Быкова и С. П. Соловьева. М., Атомиздат, 1967. 427 с. с ил.

34. **Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М.** Теория теплового пробоя электрической изоляции, находящейся под воздействи-

ем радиоактивных излучений. — «Техническая физика», 1967, том XXXVII, вып. 8, с. 1514—1518.

35. **Надежность в технике**, термины. ГОСТ 13377-167. М., 1968, Введ. 1.7.68, 15 с.

36. **Козлов Б. А., Ушаков И. А.** Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Советское радио», 1966. 432 с. с ил.

37. **Гусев В. Н., Смирнов В. Ф.** Электрические конденсаторы постоянной емкости. М., «Советское радио», 1968. 87 с. с ил.

38. **Шор Я. Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М., «Советское радио», 1962. 552 с. с ил.

39. **Перроте А. И., Карташов Г. Д., Цветаев К. Н.** Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. М., «Советское радио», 1968. 224 с. с ил.

40. **Ренне В. Т.** Ускоренные испытания бумажных конденсаторов. — «Электричество», № 6, 1947.

41. **Endicott H. S., Hatck B. D., Sohmer R. G.** Application of the Eyring model to capacitor aging date, IEEE, Transactions on component Parts, 1965, v. 12, № 1.

42. **Beyerleik F.** Beitrag zur Frage der Zurverlössigkeit von Bauelementen unter Betriebs und Denevversuchsbedingungen. Nachrichtentechnische Fachberichte, 1961, № 24.

43. **Хейнс.** Определение коэффициента ускоренных испытаний на надежность стеклоэмалевых конденсаторов. — «Труды 8-го национального симпозиума по надежности и контролю качества». 1962, с. 73.

44. **Некрасов М. М., Франчук А. Н.** Оценка надежности керамических трубчатых конденсаторов. — «Изв. вузов СССР. Радиотехника», 1964, т. VII, № 3, с. 00.

45. **Petrik P.** Kurzprüfungen und Donerverhalten bei Kondensatoren. — «Radiomentor», 1962, № 13, p. 12—17.

46. **Дущенко В. К.** Применяемость типовых элементов РЭА. М., «Советское радио», 1971. 96 с. с ил.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Общие сведения о конденсаторах и их характеристиках	5
1-1. Области применения и классификация конденсаторов	5
1-2. Емкость конденсатора. Конденсаторные диэлектрики	9
1-3. Температурный коэффициент емкости. Относительное изменение емкости	16
1-4. Диэлектрическая абсорбция	22
1-5. Потери энергии	25
1-6. Сопротивление изоляции	33
1-7. Электрическая прочность	36
1-8. Полное сопротивление	45
Глава вторая. Характеристики конденсаторов основных типов	48
2-1. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком	48
2-2. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком	65
2-3. Конденсаторы с оксидным диэлектриком	87
2-4. Конденсаторы с газообразным диэлектриком	191
Глава третья. Особенности эксплуатации конденсаторов в различных электрических режимах	104
3-1. Классификация видов электрических нагрузок конденсаторов	104
3-2. Расчетные соотношения для определения допустимых нагрузок конденсаторов, работающих при переменном напряжении	107
3-3. Расчет потерь энергии при несинусоидальном напряжении	110
3-4. Влияние ионизационных процессов и импульсных токов на работоспособность конденсаторов	132
3-5. Определение стандартных уровней электрических нагрузок конденсаторов	136
3-6. Допустимые уровни импульсных электрических нагрузок для массовых типов конденсаторов	160
3-7. Сравнительные электрические характеристики различных типов конденсаторов при одинаковых условиях нагружения	162
Глава четвертая. Влияние внешней среды и механических нагрузок на конденсаторы	166
4-1. Влияние климатических факторов внешней среды на эксплуатацию конденсаторов	166
4-2. Устойчивость конденсаторов к внешним механическим воздействиям	177
4-3. Изменение свойств конденсаторов под воздействием ионизирующих излучений	185
Глава пятая. Надежность конденсаторов	190
5-1. Основные понятия и показатели	190
5-2. Требования, предъявляемые к надежности конденсаторов	196
5-3. Методы испытания на надежность	200
5-4. Основные положения методики ускоренных испытаний на надежность некоторых керамических конденсаторов	210
Список литературы	222

Цена 67 коп.